

# **Optimierte Messung der Bierschaumstabilität in Abhängigkeit von Milieubedingungen und fluiddynamischen Kennwerten**

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Marco Potreck

von der Fakultät III – Prozesswissenschaften  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr. sc. rer. nat. Herbert Kunzek  
Berichter Prof. Dr. sc. techn. Bernhard Senge  
Prof. Dr. sc. techn. Gerolf Annemüller  
Priv.-Doz. Dr.-Ing. Hartmut Evers

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 30. 01. 2004

Berlin 2004

D 83

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand zu wesentlichen Teilen während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Zentrallaboratorium bei der Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei (VLB) im Berlin in der Zeit von 1999 bis 2003.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. B. Senge bedanken, der die Arbeit nach Kräften gefördert hat und immer wieder Anregungen gab, die zur umfassenden Betrachtung des Themas nötig waren.

Ferner gilt mein Dank Herrn Prof. G. Annemüller und Priv.-Doz. Dr. H. Evers, die sich als Gutachter zur Verfügung gestellt haben.

Die Mitarbeiter des Zentrallaboratoriums der VLB haben sehr viel zum Gelingen der Arbeit beigetragen, der Wert einer solchen kollegialen und freundschaftlichen Unterstützung kann man nicht hoch genug bewerten.

Stellvertretend können nur drei Personen genannt werden, die, jeder in seinem Bereich das entsprechende geleistet haben:

Dr. Ing. Heinz-Michael Anger für die wissenschaftliche Seite;

Braumeister Manfred Staruß für die menschliche;

Andreas Nitschke für die humoristische.

Das Gelingen der Arbeit hing ganz wesentlich vom Nachschub an frischem Probenmaterial ab, den Berliner Brauereien, die stets bereit waren die großen Mengen bereitzustellen, sollten nicht unerwähnt bleiben.

Alles wäre nichts, wenn die Gedanken und Schlussfolgerungen nicht in ein Ergebnis umgesetzt würden. Eben dies hat die Firma Steinfurth Messsysteme übernommen. Dank an die Herren Dipl.-Ing. Martin Falkenstein und Dipl.-Ing. Henning Schanz.

Der private Teil eines solchen Vorwortes ist wohl schwerer als die ganze Arbeit selbst. Meine Mutter, die das alles erst ermöglicht hat, mein Onkel Eddy, der mich viel zu oft auf den Boden der Tatsachen zurückholen musste, ohne Euch wäre ich sicher nicht an diesem Punkt. Ich selber wüsste nicht, ob ich ähnlich viel Verständnis und Geduld aufbringen könnte. Gleiches gilt sicher auch für Marillo, Daniel und Lena.

Erfolg oder nicht, das mögen andere beurteilen, und doch weiß ich genau, dass die rückhaltlose Unterstützung meiner Lebensgefährtin so wichtig war. Da reicht wohl ein Dank kaum aus. Fabienne, Du weißt, dass es ohne Dich wohl nie geklappt hätte.

Eine Erklärung wäre zu kompliziert, danke Jonas und Walfischchen.

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                            | Seite |
|----------------------------------------------------------------------------|-------|
| I. Titelblatt .....                                                        |       |
| II. Inhaltsverzeichnis .....                                               | I     |
| III. Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole .....             | V     |
| IV. Kurzzusammenfassung .....                                              | VIII  |
| V. Abstract .....                                                          | IX    |
| 1. Einleitung.....                                                         | 1     |
| 2. Aufgabenstellung.....                                                   | 3     |
| 3. Stand des Wissens.....                                                  | 6     |
| 3.1. Schäume als Lebensmittelsysteme.....                                  | 6     |
| 3.2. Bierschaum.....                                                       | 8     |
| 3.2.1. Physikalische Grundlagen des Bierschaums.....                       | 8     |
| 3.2.1.1. Blasengrößenverteilung.....                                       | 11    |
| 3.2.1.2. Dynamische Viskosität.....                                        | 13    |
| 3.2.1.3. Temperaturabhängigkeit des Viskositätsverhaltens.....             | 14    |
| 3.2.1.4. Einflüsse der Bierinhaltsstoffe auf das Viskositätsverhalten..... | 15    |
| 3.2.1.5. Oberflächenspannung.....                                          | 15    |
| 3.2.1.6. Dichte.....                                                       | 18    |
| 3.2.1.7. Gaskomponente.....                                                | 19    |
| 3.2.1.8. Dalton- und Henry-Gesetze für ideale Systeme.....                 | 20    |
| 3.3. Die Geschichte der Schaummessung.....                                 | 21    |
| 3.4. Chemische und technologische Grundlagen.....                          | 31    |
| 3.4.1. Bierinhaltsstoffe.....                                              | 29    |
| 3.5. Technologische Einflussfaktoren auf den Bierschaum.....               | 33    |
| 3.5.1. Rohstoffauswahl.....                                                | 33    |
| 3.5.2. Mälzung.....                                                        | 34    |
| 3.5.3. Würzeherstellung.....                                               | 36    |
| 3.5.4. Würzebehandlung.....                                                | 41    |
| 3.5.5. Gärung.....                                                         | 41    |

|          |                                                                                                             |    |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.5.6.   | Nachgärung / Reifung.....                                                                                   | 43 |
| 3.5.7.   | Filtration.....                                                                                             | 44 |
| 3.5.8.   | Abfüllung.....                                                                                              | 45 |
| 3.5.9.   | Zusatz bierschaumstabilisierender Substanzen.....                                                           | 46 |
| 3.6.     | Bekannte Verfahren der Bierschaummessung und umweltbedingte<br>Einflussfaktoren auf diese Messmethoden..... | 46 |
| 3.6.1.   | Grundsätzliche Einflussfaktoren auf die Bierschaummessung.....                                              | 46 |
| 3.6.2.   | Ross & Clark.....                                                                                           | 49 |
| 3.6.3.   | NIBEM-Methode nach Klopfer.....                                                                             | 54 |
| 3.6.4.   | Carlsberg-System / Lg-Foamtester.....                                                                       | 57 |
| 4.       | Materialien und Methoden.....                                                                               | 58 |
| 4.1.     | Materialien.....                                                                                            | 58 |
| 4.2.     | Schaummessgeräte.....                                                                                       | 59 |
| 4.2.1.   | Lg-Foamtester.....                                                                                          | 59 |
| 4.2.1.1. | Messprinzip.....                                                                                            | 59 |
| 4.2.1.2. | Temperaturkompensation.....                                                                                 | 60 |
| 4.2.1.3. | Detektion der Zerfallszeiten.....                                                                           | 61 |
| 4.2.1.4. | Bedienung des Geräts.....                                                                                   | 61 |
| 4.2.1.5. | Ablauf einer Messung.....                                                                                   | 61 |
| 4.2.1.6. | Schauminduktion.....                                                                                        | 64 |
| 4.2.1.7. | Kalibrierung des Messgeräts.....                                                                            | 67 |
| 4.2.2.   | Ross & Clark.....                                                                                           | 67 |
| 4.2.3.   | NIBEM-Methode.....                                                                                          | 68 |
| 4.2.4.   | Eigenentwicklung.....                                                                                       | 68 |
| 4.3.     | Periphere physikalische Untersuchungen.....                                                                 | 69 |
| 4.3.1.   | Viskositätsverhalten.....                                                                                   | 69 |
| 4.3.1.1. | Kapillarmessungen.....                                                                                      | 69 |
| 4.3.1.2. | Rotationsviskosimetrie mittels Zylindermessverfahren.....                                                   | 69 |
| 4.3.2.   | Oberflächenspannung.....                                                                                    | 70 |
| 4.3.3.   | Dichte.....                                                                                                 | 70 |
| 5.       | Ergebnisse.....                                                                                             | 71 |
| 5.1.     | Fluiddynamische Kennwerte wichtiger Biersorten.....                                                         | 71 |
| 5.1.1.   | Dichte.....                                                                                                 | 71 |
| 5.1.2.   | Viskositätsverhalten .....                                                                                  | 72 |
| 5.1.2.1. | Viskositätsverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur.....                                                | 72 |

|          |                                                                                                                      |     |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.2.2. | Ermittlung der Fließaktivierungsenergie.....                                                                         | 75  |
| 5.1.3.   | Oberflächenspannung.....                                                                                             | 78  |
| 5.2.     | Vergleichende Schaummessung.....                                                                                     | 80  |
| 5.2.1.   | Lg-Foamtester im Vergleich zur Schaummessung nach Ross & Clark.....                                                  | 81  |
| 5.2.2.   | NIBEM-Apparat im Vergleich zur Schaummessung nach Ross & Clark.....                                                  | 85  |
| 5.2.3.   | NIBEM-Apparat im Vergleich zum Lg-Foamtester.....                                                                    | 86  |
| 5.3.     | Überprüfung der Genauigkeit der Temperaturkompensation.....                                                          | 87  |
| 5.3.1.   | Probentemperatur und Schaumvolumen.....                                                                              | 87  |
| 5.3.2.   | Probentemperatur und First Drain.....                                                                                | 88  |
| 5.3.3.   | Probentemperatur und Half Life-Time.....                                                                             | 89  |
| 5.4.     | Untersuchungen des Einflusses des Viskositätsverhaltens auf die<br>fluiddynamischen Vorgänge in der Düse.....        | 92  |
| 5.5.     | Überlagerte Einflüsse durch Temperaturkompensation und<br>Viskositätsverhalten der Probe.....                        | 93  |
| 5.6.     | Zusammenfassende Bewertung.....                                                                                      | 94  |
| 5.7.     | Diskussion der Ergebnisse.....                                                                                       | 95  |
| 5.7.1.   | Fluiddynamische Kennwerte und deren milieubedingten Veränderungen...                                                 | 95  |
| 5.7.1.1. | Dichte.....                                                                                                          | 95  |
| 5.7.1.2. | Viskositätsverhalten und Fließaktivierungsenergie.....                                                               | 96  |
| 5.7.2.   | Vergleich der Methoden der Schaummessung.....                                                                        | 96  |
| 5.7.3.   | Bewertung der Temperaturkompensation.....                                                                            | 97  |
| 5.7.4.   | Abhängigkeiten der zu messenden Parameter des Lg-Fomtesters von<br>anderen physikalischen Kennwerten des Bieres..... | 100 |
| 6.       | Betrachtung der Einflüsse der Milieubedingungen.....                                                                 | 102 |
| 6.1.     | Umgebungseinflüsse.....                                                                                              | 102 |
| 6.1.1.   | Temperatureinfluss.....                                                                                              | 102 |
| 6.1.2.   | Umgebungsdruck.....                                                                                                  | 106 |
| 6.1.2.1. | Schaumvolumen.....                                                                                                   | 107 |
| 6.1.2.2. | First Drain.....                                                                                                     | 109 |
| 6.1.2.3. | Half Life-Time.....                                                                                                  | 110 |
| 6.1.3.   | Luftbewegung.....                                                                                                    | 111 |
| 6.1.4.   | Andere Umwelteinflüsse.....                                                                                          | 112 |
| 6.2.     | Diskussion der Ergebnisse.....                                                                                       | 112 |
| 6.2.1.   | Temperatur der Umgebung.....                                                                                         | 112 |
| 6.2.2.   | Absolutdruck.....                                                                                                    | 114 |

|          |                                                                                                           |     |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.       | Zerfallskinetik des Bierschaums.....                                                                      | 117 |
| 7.1.     | Ermittlung einer Zerfallskurve.....                                                                       | 117 |
| 7.2.     | Vergleich der Zerfallskurve mit der bisherigen Ergebnisangabe.....                                        | 121 |
| 7.3.     | Abhängigkeit der Zerfallskinetik von anderen physikalischen Größen.....                                   | 123 |
| 7.3.1.   | Viskositätsverhalten.....                                                                                 | 123 |
| 7.3.1.1. | Viskositätsverhalten und First Drain.....                                                                 | 123 |
| 7.3.1.2. | Viskositätsverhalten und Half Life-Time.....                                                              | 124 |
| 7.4.     | Auswirkungen der Ergebnisse auf die Kalibrierstrategie und Forderungen<br>für weitere Modifikationen..... | 125 |
| 7.5.     | Diskussion der Ergebnisse.....                                                                            | 127 |
| 8.       | Weiterentwickelte Schaummessstechnik.....                                                                 | 129 |
| 8.1.     | Erster Entwicklungsschritt.....                                                                           | 129 |
| 8.2.     | Zweiter Entwicklungsschritt.....                                                                          | 130 |
| 8.3.     | Dritter und letzter Entwicklungsschritt.....                                                              | 132 |
| 8.4.     | Kalibrierstrategie.....                                                                                   | 138 |
| 8.5.     | Abschließende Untersuchungen.....                                                                         | 138 |
| 8.6.     | Diskussion der Ergebnisse.....                                                                            | 142 |
| 9.       | Ausblick für weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen.....                                         | 144 |
| 10.      | Zusammenfassung.....                                                                                      | 146 |
| 11.      | Literaturverzeichnis.....                                                                                 | 149 |
| 12.      | Anhang.....                                                                                               | 158 |

## Liste der verwendeten Abkürzungen und Symbole

### Abkürzungen

|              |                                                       |
|--------------|-------------------------------------------------------|
| CCD          | chain coupled device (digitales Kamerasystem)         |
| CMC          | critical micelization concentration                   |
| DK           | Dänemark                                              |
| DLG          | Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft (Frankfurt/Main) |
| dyn.         | dynamisch                                             |
| EBC          | European Brewers Convention                           |
| Fa.          | Firma                                                 |
| FAN          | Freier Amino Stickstoff                               |
| IDM          | induktive Durchflußmessung                            |
| Kap.         | Kapitel                                               |
| kDa          | Kilodalton (Molekulargewicht)                         |
| LED          | Lumineszenzdiode                                      |
| N-Fractionen | Stickstofffraktionen (Proteine)                       |
| NN           | Normalnull (Meereshöhe)                               |
| p.a.         | per analysi (zur Analyse)                             |
| ppm          | parts per million                                     |
| Pt 100       | Widerstandthermometer (Grundwiderstand 100 Ohm)       |
| PVPP         | Polyvinylpolypyrrolidon                               |
| Tab.         | Tabelle                                               |
| ZKL          | zylindro-konischer Lagertank                          |

### Symbole

|                |                                                     | Einheit      |
|----------------|-----------------------------------------------------|--------------|
| $\alpha$       | Irrtumswahrscheinlichkeit                           | -            |
| $\Delta$       | Differenz                                           |              |
| $\dot{\gamma}$ | Schergeschwindigkeit                                | $s^{-1}$     |
| $\delta$       | Dicke der Diffusionsflüssigkeitsschicht             | m            |
| $\eta$         | dynamische Viskosität                               | $Pa \cdot s$ |
| $\nu$          | kinematische Viskosität                             | $m^2/s$      |
| $\rho$         | Dichte                                              | $kg/m^3$     |
| $\Sigma$       | Summe                                               | -            |
| $\Sigma$ -Wert | mittlere statistische Lebensdauer einer Schaumblase | -            |
| $\sigma$       | Oberflächenspannung                                 | N/m          |

|                      |                                                  |                   |
|----------------------|--------------------------------------------------|-------------------|
| $\tau$               | Schubspannung                                    | Pa                |
| A                    | Fläche                                           | m <sup>2</sup>    |
| A <sub>S</sub>       | Stoffkonstante                                   | Pas               |
| a                    | Biervolumen nach 2 min Zerfall                   | ml                |
| b <sub>F</sub>       | Filmbreite                                       | m                 |
| b <sub>K&amp;S</sub> | Biervolumen des Zerfalls zwischen 225 und 245 s  | ml                |
| b                    | Biervolumen zwischen 2 und 10 Minuten Zerfall    | ml                |
| c <sub>K</sub>       | Konzentration                                    | kg/kg             |
| c <sub>K&amp;S</sub> | Biervolumen des verbleibenden Schaums nach 245 s | ml                |
| c                    | Biervolumen des verbleibenden Schaums            | ml                |
| D                    | Gasdiffusionskoeffizient                         | m <sup>2</sup> /s |
| d <sub>Düse</sub>    | Durchmesser der Düse                             | m                 |
| E <sub>A</sub>       | Fließaktivierungsenergie                         | J/mol             |
| F <sub>σ</sub>       | Kraft der Oberflächenverspannung                 | N                 |
| F                    | Kraft                                            | N                 |
| f                    | Schaumkonstante                                  | -                 |
| g                    | Erdbeschleunigung                                | m/s <sup>2</sup>  |
| h <sub>F</sub>       | Filmdicke                                        | m                 |
| h <sub>S</sub>       | Schaumkonstante                                  | -                 |
| h                    | Höhe                                             | m                 |
| H <sub>i</sub>       | Henry-Konstante                                  | Pa                |
| i                    | Gaskomponente                                    | -                 |
| k <sub>i</sub>       | Reziprokwert der Henry-Konstante                 | 1/Pa              |
| k                    | spezifische Schaumkonstante des Bieres           | 1/s               |
| n                    | Anzahl der Wertepaare                            | -                 |
| O                    | Oberflächenspannungszahl                         | N/m               |
| O <sub>i</sub>       | gemessene Oberflächenspannung                    | N/m               |
| O <sub>w</sub>       | Oberflächenspannungszahl von Wasser              | N/m               |
| p                    | Druck                                            | Pa                |
| p <sub>ges</sub>     | Gesamtdruck                                      | Pa                |
| p <sub>0</sub>       | atmosphärischer Druck                            | Pa                |
| p <sub>F</sub>       | Förderdruck                                      | Pa                |
| p <sub>i</sub>       | Partialdruck                                     | Pa                |
| p <sub>kor</sub>     | Korrekturdruck                                   | Pa                |
| Pr                   | verbleibendes Biervolumen im Schaum              | %                 |
| Pt                   | Gesamtschaumfähigkeit                            | -                 |
| p <sub>v</sub>       | Vergleichsdruck                                  | Pa                |

|                |                                     |                   |
|----------------|-------------------------------------|-------------------|
| $R$            | Düsenradius                         | m                 |
| $\mathfrak{R}$ | allgemeine Gaskonstante             | J/K • mol         |
| $r_0$          | Gasblasenradius zum Zeitpunkt $t=0$ | m                 |
| $S$            | Gaslöslichkeitskoeffizient          | -                 |
| $S_1$          | Schaumzahl 1                        | -                 |
| $S_2$          | Schaumzahl 2                        | -                 |
| $T$            | absolute Temperatur                 | K                 |
| $t_s$          | Gesamtzerfallszeit des Schaums      | s                 |
| $t$            | Zeit                                | s                 |
| $t_H$          | Halbwertszeit des Schaums           | s                 |
| $V$            | Luftvolumen                         | ml                |
| $\dot{V}$      | Volumenstrom                        | m <sup>3</sup> /s |
| $V_s$          | Schaumvolumen                       | ml                |
| $V_m$          | mittleres Schaumvolumen             | ml                |
| $v$            | Geschwindigkeit                     | m/s               |
| $w$            | Geschwindigkeit                     | m/s               |
| $W$            | Schaumgewicht zum Zeitpunkt $t$     | g                 |
| $W_0$          | Schaumgewicht zum Zeitpunkt $t=0$   | g                 |
| $X_i$          | Molenbruch der Gaskomponente        | -                 |
| $y_i$          | Molanteil                           | -                 |

## Kurzzusammenfassung

Die Forschungen nach einer verbindlichen Referenzmethode für die Messung der Schaumhaltbarkeit von Bier dauern seit ca. 100 Jahren an. Bisher haben sich zwei Methoden durchgesetzt, die Methode nach Ross & Clark – als Referenzmethode – und die weitgehend automatisierte Methode mit Hilfe des NIBEM-Apparates, welche sich wiederum für die Routineanalytik im Labor eignet.

Ziel der Arbeit war es ein System zu entwickeln, die Vorteile einer guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse mit der weitgehenden Automatisierung der NIBEM-Methode zu verbinden.

Deshalb wurden die wesentlichen physikalischen Parameter, welche die Schaumbildung und –haltbarkeit beeinflussen, untersucht. Neben der Überprüfung der Einflüsse von Viskositätsverhalten und Oberflächenspannung waren es in erster Linie die Umweltbedingungen welche einer genauen Betrachtung unterzogen wurden.

Es zeigt sich, dass die Parameter Umgebungsdruck und Temperatur den Bierschaum und seinen Zerfall maßgeblich beeinflussen.

Eine erhöhte Temperatur beschleunigt den Zerfall des Schaums bedingt durch die progressiven Abnahmen der dynamischen Viskosität und der Oberflächenspannung und die damit verbundenen Auswirkungen für das Lamellensystem des Bierschaums.

Der Druck wirkt sich unterschiedlich, je nach Phase des Schaumzerfalls, aus.

Ein auf dem System „Lg-Foamtester“ basierendes weiterentwickeltes Schaummessgerät mit geschlossener Messkammer, in welcher standardisierte Bedingungen hinsichtlich Druck und Temperatur geschaffen werden können, normiert diese Einflussparameter. Durch die Standardisierung der Parameter können diese hinsichtlich ihres Einflusses auf die Schaumhaltbarkeit ausgeschlossen werden.

Durch die Schaffung isobarer und isothermer Verhältnisse herrschen global die gleichen Verhältnisse für Schaumbildung und Schaumhaltbarkeit. Der Messwert der Schaumstabilität ist nur noch durch die biereigenen Eigenschaften determiniert.

Die weitgehende Automatisierung des Gerätes verbunden mit einer guten Korrelation mit den Messwerten nach Ross & Clark zeigt, dass der Versuchsaufbau sowohl für die Referenzanalyse als auch für die Routineanalytik sehr gut geeignet ist. Eine niedrige Standardabweichung der Messwerte über alle Biersorten hinweg belegt die statistische Sicherheit der gewonnenen Ergebnisse.

Die von der Grundkonzeption ausgehenden Modifikationen des Lg-Foamtesters bleiben wirtschaftlich in einem vertretbaren Rahmen, so dass das neu entwickelte Gerätesystem vergleichbare Investitionskosten zu anderen Systemen aufweist.

## **Abstract**

The research for an obligatory reference measuring method for beer foam stability persists for the last 100 years. During this time only two methods have been established. The Ross & Clark method – as reference method – and the NIBEM-apparatus, which works more or less automatically. Because of that the NIBEM-method is often used in brewery laboratories for routinely foam measurement.

The object of paper was to develop a foam measuring system, which links the advantages of the Ross & Clark method – consistent measuring values – to those of the NIBEM-apparatus, the high grade of automation.

The essential parameters, which influence foam formation and stability, were examined. After the test of the influence of viscosity and surface tension the environmental conditions of foam measurement were targeted.

The parameters environmental pressure and temperature have a great influence on beer foam and its disintegration.

A rising temperature accelerates foam breakdown caused by the progressive decrease of dynamic viscosity and surface tension and the consequences for the system of lamellas of beer foam.

The environmental pressure influences the foam in different ways.

Also the influence of detergents on the foam was tested.

A new foam measuring system based on the already introduced “Lg-Foamtester” with a closed sample cell, in which the standardized conditions prevail, the same pressure and temperature can be introduced to the sample which has to be measured. The influence on foam formation and decay can be led to zero respectively standardized.

The creation of isothermic and isobaric conditions lead to a globally working foam measuring apparatus. The value of the measurement is only determined by the beer properties themselves.

The far-reaching automation of the measuring device linked to the good correlation of the values of the Ross & Clark method shows that the new measuring structure is suitable for the reference measurement on the one hand, and routine analytics on the other. The low standard deviation in all kinds of beer determines the high significance of the results.

The modifications of the Lg-Foamtester are economically justifiable, so the new system can easily be compared to other systems. The new system is very easy to handle, what leads to a saving in costs of the daily laboratory work.

Furthermore the system has to be cleaned every to weeks only, so the handling of dangerous chemicals is also reduced to a minimum.

## **1. Einleitung**

Der Bierschaum und die Bierschaumstabilität beschäftigen die Wissenschaft seit geraumer Zeit. Die Vorgänge bei Bildung, Lebensdauer und Zerfall sind Gegenstand der Technologieführung und einer der Hauptparameter der Qualitätssicherung in Brauereien. Der Bierschaum ist auch für Laien ein Indikator der Bierqualität.

Unbestritten ist, dass der Bierschaum einen wichtigen Qualitätsparameter darstellt, welcher in großen vergleichenden Untersuchungsreihen als Kernpunkt der Bewertungsschemata integriert wurde.

Viele weitere Analysenwerte, die innerhalb der Routineanalytik gewonnen werden, sind vom Technologen mit der Frage begleitet: „Wie wirkt sich das auf den Schaum aus?“. Gleiches gilt für Änderungen der Herstellungstechnologie.

Der Schaum ist für den Konsumenten der erste Sinneseindruck, der bereits lange vor dem Verzehr eines gezapften Bieres wahrgenommen wird. Die Schaumbildung im Glas während des Zapfens, sein Verhalten während des Verzehrs und nicht zuletzt das Aussehen sind von elementarer Bedeutung.

Für den Technologen ist die gleichbleibende Stabilität des Schaums unabhängig von Einflüssen der Rohstoffe und der Verfahrensbedingungen wichtig. Der visuelle Eindruck gibt immer gute und nützliche Hinweise auf die Haltbarkeit des Schaums. Konkrete Ergebnisse, gestützt von Zahlenwerten, kann nur eine ausreichend reproduzierbare objektive Analytik geben. Eine Messmethode muss jedoch heute auch noch anderen Zwängen folgen: schnell, einfach, automatisierbar, günstig, personalexintensiv sind Schlagworte dieser Forderungen.

Vorschläge zur Methodik wurden seit Beginn des 19. Jahrhunderts gemacht. Jedoch wurde bisher kein System entwickelt, welches allen genannten Forderungen gerecht werden kann. Ein Messsystem, dessen Ergebnis als Standard angesehen werden kann, wurde bisher nicht entwickelt.

An heißen Sommertagen kommt die Schaumanalytik in vielen Laboratorien ganz zum Erliegen, weil keine reproduzierbaren Ergebnisse erzielt werden können.

Eingeführte Methoden in die betriebliche analytische Praxis sind die Schaummessmethoden nach Ross & Clark (siehe Kap. 3.6.2.), welche bisher als die genaueste Methode mit der besten Reproduzierbarkeit angesehen wurde.

Eine schnellere und weitgehend automatisierte Methode wird durch den NIBEM-Apparat (Kap. 3.6.3.) ermöglicht, welcher für die innerbetriebliche Analytik gut geeignet ist.

Die beiden Methoden weisen jedoch sehr spezifische Nachteile auf. Die Methode nach Ross & Clark ist sehr personalaufwändig und kann nur von geschulten Mitarbeitern durchgeführt werden.

Der NIBEM-Apparat liefert keine Referenzergebnisse, da die Reproduzierbarkeit der Analysen als unzureichend zu bezeichnen ist, und die Geräte von Baureihe zu Baureihe unterschiedliche Zahlenwerte ermitteln.

Der Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Messung ist ein Problembereich, dem bisher wenig Beachtung beigemessen wurde.

## 2. Aufgabenstellung

In der Analysensammlung der MEBAK (**Mittel-Europäische Brautechnische Analysen-Kommission**) sind drei Messverfahren für den Bierschaum erwähnt:

- Ross & Clark (mit den Modifikationen von Kolbach und Schilfarth)
- NIBEM-Apparat (nach Klopfer)
- Lg-Foamtester (nach **Leif Glarø**)

Durchgesetzt haben sich in der Routineanalytik zum jetzigen Zeitpunkt die ersten beiden der genannten Methoden.

Die spezifischen Probleme sind für beide Analysengänge unterschiedlich, da voneinander differierende Messansätze vorliegen. Beim Verfahren nach Ross & Clark wird Schaum aus einer konstanten Biermenge erzeugt, bei der Klopfer-Methode wird eine gleichbleibende Schaummenge erzeugt.

Die Methode nach Ross & Clark kann nur von eingearbeitetem Personal durchgeführt werden, da viele subjektive Einflüsse eine Rolle spielen. Die „gleichmäßige“ Erzeugung des Schaums innerhalb des vorgesehenen Zeitraums, die Beobachtung des Zerfalls, das Einhalten der in der Vorschrift angegebenen Zeiten und die damit verbundene Organisation der Arbeitsvorgänge innerhalb einer Analyse machen deutlich, dass der subjektive Fehler entsprechend groß sein kann. Ferner ist es erforderlich eine kalibrierte Glasfritte zu verwenden, die hinsichtlich eines konstanten und vergleichbaren Ergebnisses der Schaumerzeugung befriedigende Werte liefert. Der Einsatz von Reinst-CO<sub>2</sub> zur Schaumerzeugung sowie die Benutzung von Chrom-Schwefelsäure zur Reinigung der Geräte machen die Analyse nicht nur – neben den Personalkosten – teuer, sondern auch gefährlich. Die Ergebnisse, die unter Beachtung aller genannten Punkte erreicht werden, sind jedoch sehr gut reproduzierbar und zählen als Referenzanalysenwerte.

Es muss konstatiert werden, dass der geringe Grad der Automatisierung und die hohen Kosten dazu geführt haben, dass die Analyse in der Laborroutine in Brauereien selten eingesetzt wird und lediglich in Auftragslaboratorien in größerem Umfang Verwendung findet.

Die zweite genannte Analysenvorschrift nach Klopfer besitzt durch die Verwendung eines Apparates einen höheren Automatisierungsgrad. Personalaufwand und Chemikalieneinsatz sind gegenüber dem Ross & Clark-Verfahren deutlich minimiert. Der Nachteil der Analyse liegt in der Streuung der Messwerte sowie in der schlechten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Innerhalb eines Brauereilabors kann der NIBEM-Apparat problemlos zur Feststellung der Schaumhaltbarkeit eingesetzt werden. Eine Korrelation mit den Werten nach Ross & Clark ist jedoch nicht

aufzuzeigen. Es ergeben sich Unterschiede bei verschiedenen Baureihen der Geräte. Die Durchführung von Vergleichsmessungen ist beim Wechsel des Gerätes erforderlich.

Beide Verfahren unterliegen durch den offenen Aufbau den Umweltbedingungen wie Umgebungsdruck, Umgebungstemperatur und relativer Luftfeuchte. Diese Faktoren tragen ebenfalls zu einer Veränderung der Messergebnisse bei.

Ein neues System zur Messung des Bierschaumverhaltens, welches die Vorteile der reproduzierbaren Ergebnisse nach Ross & Clark mit dem einfachen Handling und geringen Personalaufwand verbindet, ist zu konzipieren und zu testen.

Der Lg-Foamtester scheint in seiner Grundkonzeption einige dieser Forderungen zu erfüllen, wobei jedoch verschiedenste Fragen zu klären sind.

Eine genaue Quantifizierung der Umgebungseinflüsse wurde bisher nicht durchgeführt, wobei jedoch nicht alle Faktoren in eine Betrachtung einbezogen werden können, da eine wiederholbare Darstellung dieser Bedingungen nicht möglich ist. Exemplarisch sei hier die Partikelbelastung der Luft genannt.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen soll ein Beitrag zur Entwicklung eines Messsystems geliefert werden, welches durch seinen Aufbau den Einfluss der Umweltbedingungen weitgehend ausschließt. Hierzu soll die Standardisierung der in einer geschlossenen Messkammer herrschenden Verhältnisse beitragen.

Der Lg-Foamtester bringt zur Erfüllung dieser Forderungen einige konstruktive Vorteile mit sich. So ist bereits ein hoher Automatisierungsgrad erreicht, eine geschlossene Messkammer ist vorhanden.

Das Gerät ist eine dänische Entwicklung und infolge dessen den dortigen Produktverhältnissen angepasst, wobei sich der Einfluss der Carlsberg-Brauerei auf den Konstruktionsprozess widerspiegelt. Der Lg-Foamtester ist eine vereinfachte Ableitung aus einem sich in den Carlsberg-Laboratorien befindenden Gerätes.

Die Einflüsse der Umgebung sollen zunächst grundlagenwissenschaftlich quantifiziert und die Auswirkungen auf das Messergebnis bewertet werden. Hierzu werden die Faktoren Umgebungsdruck und – temperatur und davon abhängige Stoffkennwerte untersucht. Dies gilt für die Faktoren, welche selbst von Umgebungsbedingungen beeinflusst sind. Hier sind Oberflächenspannung, Viskosität sowie Dichte zu nennen.

Die Methode sollte hinsichtlich des Einsatzes völlig unabhängig vom Standort und dessen Gegebenheiten sein. Durch eine Automatisierung soll der Personaleinsatz auf ein Minimum reduziert werden.

Die Ermittlung der für die Schaumstabilität und den Schaumzerfall mitverantwortlichen fluiddynamischen Kennwerte sowie die Entwicklung eines von den Milieubedingungen unabhängigen Schaummessgerätes sind Gegenstand dieser Arbeit.

### **3. Stand des Wissens**

Die Bedeutung der Bildung eines Schaums kann in verschiedenen technischen Prozessen völlig unterschiedlich sein. In einigen verfahrenstechnischen Prozessen soll die Bildung eines Schaums komplett vermieden werden.

In der Lebensmitteltechnologie ist die Schaumbildung in einer Vielzahl von Prozessen ein gewollter Vorgang.

#### **3.1. Schäume als Lebensmittelsysteme**

Schäume spielen bei der Herstellung von Lebensmitteln eine große Rolle. Die Stabilität des Schaums ist ein wichtiger Parameter der Qualitätssicherung.

Zur Bildung eines Schaums ist es erforderlich, das Dispersum (der verteilte Stoff) mit dem Dispersionsmittel (Stoff, in dem die andere Komponente verteilt ist) in Interaktion treten zu lassen.

Beispielhaft sei die Gasbildung innerhalb eines gärenden Teiges und die anschließende Fixierung der Proteinmatrix durch den Backvorgang genannt. Hier wird das Dispersum im Dispersionsmittel durch mikrobiologische oder chemisch induzierte Stoffwechselvorgänge gebildet.

Verbreitet sind Aufschlagvorgänge zur Herstellung einer metastabilen Protein-Lipid-Matrix, z.B. für Dessert-Produkte.

Bei der Sahneherstellung wird die Gasphase künstlich durch Feinverteilung und Hochscherprozesse in den Rahm eingebracht und dort stabilisiert.

Eine weitere Möglichkeit der Schaumbildung trifft auf die Bildung eines Bierschaums zu, bei der sich der Schaum durch den Druckabbau innerhalb eines Systems bildet, in dem bereits Gas in physikalisch bzw. chemisch gelöster Form vorliegt. Gleiches gilt für Schaumweine oder Limonadengetränke.

Die Schaumbildung hängt in erster Linie von der Gegenwart von Substanzen ab, welche die Oberflächenspannung herabsetzen und sich in jeder entstehenden Oberfläche anreichern. In der zweiten Phase der Schaumbildung werden die nun vorliegenden Schaumlamellen stabilisiert.

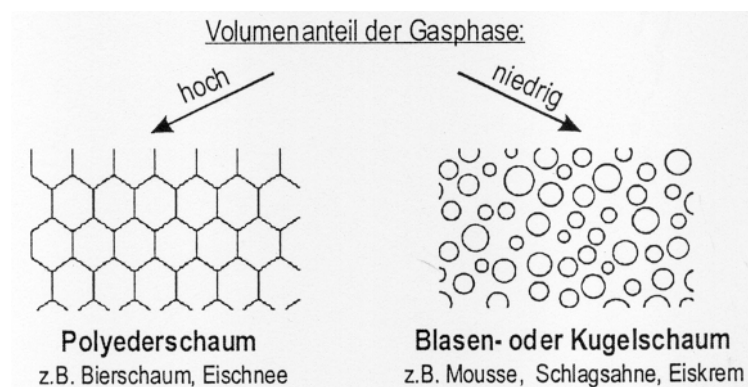
Alle Schäume gehören zu den Dispersionen. Gemeint ist eine feine Verteilung eines Stoffes in einem anderen /1/. Die Stoffe können unterschiedliche Aggregatzustände besitzen. Nachfolgend seien einige Schäume dargestellt, welche die unterschiedlichen Aggregatzustände beschreiben:

**Tab. 3.1.: Einteilung zweiphasiger disperser Systeme**

| Disperse Phase | Dispersionsmittel  | Disperses System    | Beispiele                    |
|----------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
|                | <b>Gas</b>         | <b>Aerosole</b>     |                              |
| Flüssigkeit    | Gas                | Flüssigkeitsaerosol | Flüssigkeitsver-<br>sprühung |
| Feststoff      | Gas                | Feststoffaerosol    | Staub, Pulver                |
|                | <b>Flüssigkeit</b> | <b>Lyosole</b>      |                              |
| Gas            | Flüssigkeit        | Gasdispersionen     | Eiweißschaum                 |
| Flüssigkeit    | Flüssigkeit        | Emulsion            | Milch,<br>Salatdressing      |
| Feststoff      | Flüssigkeit        | Suspension, Sol     | Fruchtnektar                 |
|                | <b>Feststoff</b>   | <b>Xeroge</b>       |                              |
| Gas            | Feststoff          | fester Schaum       | Baiser                       |
| Flüssigkeit    | Feststoff          | feste Emulsion      | Magarine                     |
| Feststoff      | Feststoff          | feste Suspension    | Erstarrte<br>Kakaomasse      |

Bierschaum kann in die Tabelle nur schlecht eingefügt werden, da eine Einordnung wegen des schwankenden Verhältnisses Flüssigkeits- zu Gasanteil nicht eindeutig ist. Soll eine Wahl aus den in Tab. 3.1. genannten Möglichkeiten getroffen werden, ist die Einteilung als Gasdispersion naheliegend.

Innerhalb des Zerfallsprozesses eines Schaums erfolgt die Umlagerung von einem hochstabilisierten Polyederschaum zu einem Kugelschaum, anschließend der Übergang in eine Flüssigkeit. Der Gasanteil im Schaum nimmt im Verlauf dieses Prozesses ab. Dies macht die folgende Abbildung deutlich.



**Abb. 3.1. : Schematische Darstellung von Polyeder- und Kugelschaum**

Die Mehrzahl der lebensmittel-technologisch relevanten Schäume entsteht durch die Interaktion eines Gases mit einer fluiden Matrix.

Im Spezialfall Bier ist es die aus vielen verschiedenen Substanzen bestehende Flüssigkeit und das Gas Kohlendioxid. Die Abhängigkeit der Schaumstabilität vom Gehalt hochmolekularer Proteine im Bier ist seit Beginn des letzten Jahrhunderts bekannt. Die Beobachtung anderer Lebensmittelsysteme (Sahne, Teige, Desserts) zeigen spezifische Interaktionen.

In Produktionsprozessen erzeugte Schäume wie Schlagsahne werden in der Regel mit Stickstoff aufgeschäumt, da diese Schäume sehr viel stabiler sind als CO<sub>2</sub>-Schäume. Dies ist begründet durch die wesentlich geringere Löslichkeit von N<sub>2</sub> als von Kohlendioxid.

### **3.2. Bierschaum**

Wegen seines Verhaltens und Lebensdauer ist Bierschaum als Unikat zu bezeichnen.

Der Bierschaum ist ein wichtiger Qualitätsparameter, da er einer der ersten Sinneseindrücke ist, den der Verbraucher vor dem Verzehr des Produktes erhält. Ein unzureichender Schaum ist für den Biertrinker ein Indiz für einen schlechten Zustand des Bieres, wie beispielsweise ein „abgestandener“ Geschmack.

Nicht nur eine sensorische Bedeutung, sondern auch eine technologische geht von einem haltbaren Schaum aus. Der Schaum, quasi als immobilisiertes Gaspolster, verhindert, dass CO<sub>2</sub> ungehindert aus dem Bier diffundieren kann. Hat der Schaum eine lange Haltbarkeit, wird das sensorische Gefühl der Frische, welches in erster Linie durch einen ausreichenden CO<sub>2</sub>-Gehalt des Bieres vermittelt wird, über einen langen Zeitraum aufrechterhalten, ein positiver Geschmackseindruck entsteht.

#### **3.2.1. Physikalische Grundlagen des Bierschaums**

Der Bierschaum ist ein 2-Phasen-System, in dem der Flüssigkeitsanteil unterhalb von 10 % liegen sollte. Im Entstehungsmoment beim Einschenken liegen die Gasblasen dispergiert vor, gleichzeitig beginnt auch der Schaumzerfall. Entsprechend des Gesetzes der Entropiezunahme natürlich ablaufender Prozesse soll die Oberfläche, welche durch das Aufschäumen des Bieres stark vergrößert ist, wieder ein Minimum annehmen. Die Oberfläche strebt nach diesem Zustand. Ein glatter Flüssigkeitsspiegel soll gebildet werden.

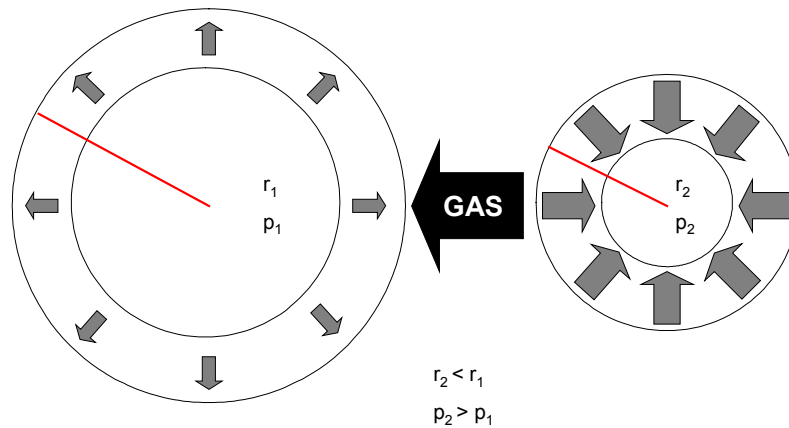
Die Ursachen für die Abnahme des Schaumvolumens liegen in drei parallel ablaufenden Prozessen:

1. An der Grenze zwischen Flüssigkeitsfilm und Umgebungsatmosphäre findet eine Verdunstung von Flüssigkeitsanteilen statt. Wegen der komplexen Zusammensetzung von Bier sind dies neben Wasser viele, deutlich leichter flüchtige Verbindungen, z. B. Alkohole. Die Verdunstung erfolgt umso schneller je größer die Partialdruckdifferenz zwischen Flüssigkeit und Atmosphäre ist /2/.
2. Aus der Grenzfläche zwischen den Blasen läuft durch die Schwerkraft Flüssigkeit ab. Die Drainage ist über den Querschnitt konstant. Durch den Ablauf wird der Flüssigkeitsverlust der unteren Schaumschichten zeitweise kompensiert /2/. Dies ist makroskopisch dadurch zu beobachten, dass sich große Gasblasen zuerst in den oberen Schichten des Schaums bilden.  
Die Wandstärke nimmt durch den Flüssigkeitsablauf ab, bis ein Wert von 20 bis 200 nm erreicht wird; die Blasenwandungen sind aber noch stabil. Das Zerplatzen einer Blase erfolgt erst durch eine zufällige Störung in der Nachbarschaft. Die Stärke der Blasenwand beträgt zu diesem Zeitpunkt gerade noch 5 nm /3/.
3. Die Größenverteilung der Blasen hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Stabilität des Schaums. In zwei voneinander unabhängigen Blasen gelten die gleichen Gesetzmäßigkeiten, jede von ihnen stellt ein stabiles System dar. Treten zwei oder mehrere Blasen miteinander in Interaktion nimmt die Stabilität durch unterschiedliche Verhältnisse ab. Verschiedene Innendrucke führen zu einer Gasdiffusion durch die Kontaktfläche in Richtung des niedrigeren Drucks /3/. Liegt im Bier eine gleichmäßige Größenverteilung vor, ist die Blasenkoaleszenzrate niedrig, d. h. eine erhöhte Schaumstabilität resultiert /2/.

Eine weitere Unterteilung der Abnahme des Bierschaums kann in zwei verschiedene Vorgänge vorgenommen werden:

1. Disproportionierung (Ostwald-Reifung)

Eine inhomogene Blasengrößenverteilung bedingt den Kontakt von Blasen unterschiedlicher Größe. Da in beiden ein unterschiedlicher Druck herrscht, kommt es zur Diffusion von Gas von der kleineren in die größere, aufgrund des größeren Innendrucks der kleineren Blase. Dies wird in folgender Abbildung deutlich:



**Abb. 3.2.: Darstellung der Ostwald-Reifung**

Der Blaseninnendruck kann nach folgendem Ansatz in Abhängigkeit von Radius und Oberflächenspannung beschrieben werden:

$$p = \frac{4 \cdot \sigma}{r} \quad \text{(Gleichung 3.1.)}$$

Der Zusammenhang der Diffusion kann durch die de Vries-Gleichung zusammengefasst werden:

$$r^2 = r_0^2 - \left( \frac{4 \cdot R \cdot t}{p_0} \right) \cdot \left( \frac{D \cdot S \cdot \sigma}{\delta} \right) \quad \text{(Gleichung 3.2.)}$$

Aus diesem Zusammenhang folgt, dass eine homogene Blasengrößenverteilung sich auf die Schaumstabilität positiv auswirkt. Ferner beeinflusst die Löslichkeit des Gases in der Flüssigkeit die Haltbarkeit des Schaums. Ein weniger gut lösliches Gas verlangsamt die Disproportionierung /4/.

## 2. Drainage

Ergänzend zu den bisherigen Aussagen wird angenommen, dass die Oberflächen proteinstabilisierter Schäume aufgrund der Adsorption oberflächenaktiver Substanzen unbeweglich sind /5/. Wird dieser ideale Zustand erreicht, kann die Drainage als Flüssigkeitsablauf zwischen zwei starren Platten angesehen werden.

Der Volumenstrom kann in folgender Formel ausgedrückt werden:

$$\dot{V} = \frac{\rho \cdot g \cdot h_F^3}{12 \cdot \eta} \cdot b_F \quad \text{(Gleichung 3.3.)}$$

In einem Kugelschaum treten vertikale Lamellen nur zufällig auf. Die Fließwege sind deutlich komplizierter und liegen stochastisch vor.

Die Gleichung 3.3. zeigt jedoch, dass die Filmdicke und Filmbreite bei Schäumen, die einen geringeren Gasanteil aufweisen, den Volumenstrom

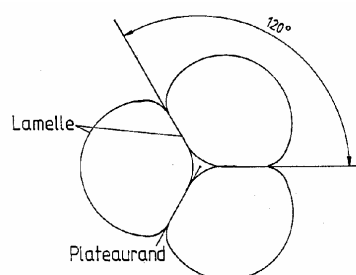
vergrößern. Die Drainage wird beschleunigt, der Schaumzerfall verläuft schneller.

### 3.2.1.1. Blasengrößenverteilung

Neben den beschriebenen generellen Vorgängen beim Zerfall des Bierschaums sind auf Ebene der Blasen weitere Vorgänge zu beobachten.

Beim Zusammenstoß zweier Blasen an der Flüssigkeitsoberfläche bildet sich automatisch ein gemeinsames Stück „Blasenwand“, Lamelle genannt. Bei gleicher Blasengröße herrscht auf beiden Seiten gleicher Druck, die Lamelle ist eben. Unterschiedlich große Blasen haben unterschiedliche Innendrucke. Durch die starke Krümmung der Blasenwand bei der kleineren von den beiden hat diese auch eine größere Oberflächenspannung. Im Falle des Kontaktes der beiden Schaumblasen wölbt sich die Lamelle in Richtung der größeren Blase. Durch die Veränderung von Oberfläche und Volumina entstehen in beiden Blasen gleiche Druckverhältnisse [3]. Ein idealer Schaum besteht somit aus Blasen gleicher Größe, in denen ein einheitlicher Druck herrscht. Die Blasen lagern sich in Dreiergruppen zusammen, so dass sich ihre Lamellen punktsymmetrisch treffen. Es bildet sich eine Plateau-Grenze (nach Joseph A. Plateau). In dieser Konfiguration sind die Kräfteverhältnisse der interagierenden Blasen optimal verteilt; sie können Erschütterungen am besten standhalten.

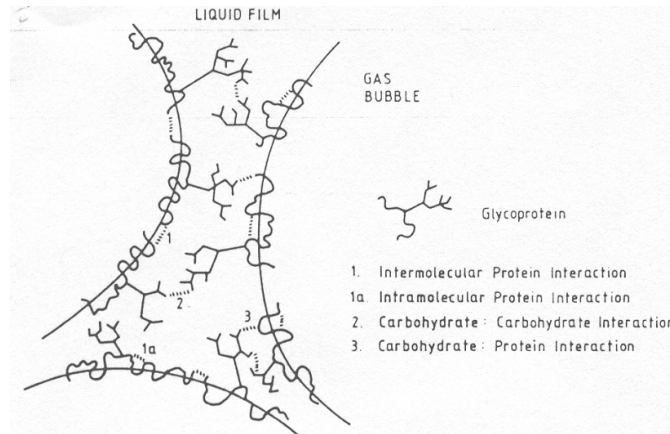
Jedoch ist auch ein idealer Schaum dem Zerfall ausgesetzt, wobei sich dieser entsprechend langsamer vollziehen würde.



**Abb. 3.3.: Optimale Dreier-Konfiguration von Schaumblasen mit Bildung einer Plateau-Grenze**

Das Zusammenwirken verschiedener physikalischer Wechselwirkungskräfte und oberflächenaktiver Substanzen beeinflusst die Schaumhaltbarkeit maßgeblich. Die

Interaktionen hochmolekularer Verbindungen im Bereich der Plateaugrenze werden durch folgende Abbildung deutlich:

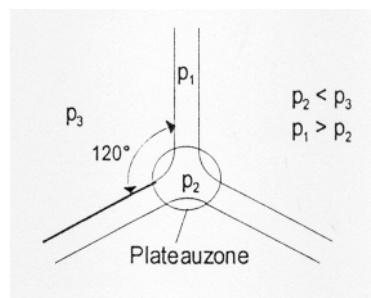


**Abb. 3.4.: Interaktion hochmolekularer Substanzen an der Phasen-Grenzfläche**

Die Moleküle tragen eine hydrophile und eine hydrophobe Gruppe. Diese Verbindungen lagern sich im Phasenübergang an, wobei das hydrophile Ende Wechselwirkungen mit dem Wasser in der Blasenwand eingeht und das hydrophobe Ende sich in Richtung der Gasphase ausrichtet [6]. Damit liegt eine Emulgatorwirkung vor, die in Bruchteilen einer Sekunde bei Hochscherprozessen wirksam wird. Verantwortlich dafür sind die Eiweißfraktionen im Bier (siehe Kap. 3.4.1.)

Die Wechselwirkungen zwischen den hydrophilen Gruppen sind wesentlich schwächer ausgeprägt als jene zwischen den Wassermolekülen und den oberflächenaktiven Substanzen.

Neben den hydrophilen und oberflächenaktiven Wechselwirkungen sind es auch die Druckverhältnisse im Bereich der Schnittstelle der 3 Schaumblasen, welche zu einer Erhöhung der Schaumstabilität betragen.



**Abb. 3.5.: Druckverteilung an der Schnittstelle der Dreier-Konfiguration**

Durch die Druckverteilung wird Flüssigkeit in den Lamellen gehalten.

### 3.2.1.2. Dynamische Viskosität

Die dynamische Viskosität ist eine von Zusammensetzung, Druck und Temperatur abhängige charakteristische Stoffeigenschaft /7/.

Definitionsgemäß ist die Viskosität eines Fluids ein Maß für die innere Reibung aufgrund des Widerstandes bei Verschiebung benachbarter Schichten.

Das Maß für die innere Reibung aufgrund des vorliegenden Molekülaufbaus ermittelt sich in Abhängigkeit von Konzentration, Temperatur und Druck. Es gilt:

$$\eta = \eta(c_K, T, p) \quad \text{(Gleichung 3.4.)}$$

Messungen von Bieren ergaben generell ein Newton'sches Fließverhalten, so dass der Newton'sche Schubspannungsansatz

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad \text{(Gleichung 3.5.)}$$

gilt.

Das Fließverhalten Newton'scher Medien zeichnet sich durch eine Unabhängigkeit der dynamischen Viskosität  $\eta$  vom Geschwindigkeitsgefälle  $\dot{\gamma}$  aus. Weiterhin sind die Schubspannung  $\tau$  und Geschwindigkeitsgefälle  $\dot{\gamma}$  direkt proportional.

Grundsätzlich wird unterschieden zwischen einer dynamischen Viskosität ( $\eta$ ) und einer kinematischen Viskosität ( $\nu$ ) /7/. Die kinematische Viskosität definiert sich nach Maxwell:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \nu(T) = \frac{\eta(T)}{\rho(T)} \quad \text{(Gleichung 3.6.)}$$

Die dynamische Viskosität wird nach DIN 1342 wie folgt definiert:

In einer laminaren Parallelströmung, in der senkrecht zur Strömungsrichtung ein lineares Geschwindigkeitsgefälle herrscht, entsteht folgende Schubspannung:

$$\dot{\gamma} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta w_x}{\Delta y} \right) = \frac{dw_x}{dy} \quad \text{(Gleichung 3.7.)}$$

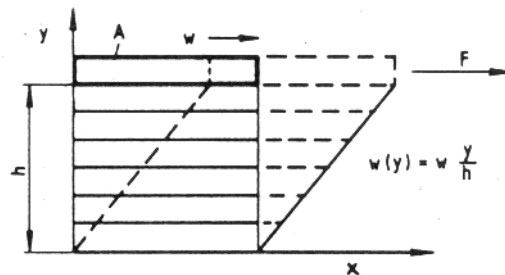
$$\Delta w_x = w_{x2} - w_{x1}$$

Die Bestimmung der dynamischen Viskosität erfolgt nach dem Prinzip der Couette-Strömung.

Folgende Randbedingungen müssen dabei eingehalten werden:

1. laminare Strömung
2. Homogenität der Messflüssigkeit (Gradientenfreiheit)
3. lineare Geschwindigkeitsverteilung im Messspalt

4. Haftbedingungen
5. Einhaltung einer DIN-Messspaltgeometrie



**Abb. 3.6.: Couette-Strömung /8/**

Die eingehenden temperatur- und konzentrationsabhängigen Materialkennwerte wie dynamische Viskosität ( $\eta$ ), Oberflächenspannung ( $\sigma$ ) sowie die Umgebungsbedingungen beeinflussen die Schaumbildung wie auch die Schaumstabilität.

Ansonsten werden im Bereich der Lebensmittel dominant hochviskose nicht-Newton'sche Flüssigkeiten angetroffen (z. B. Quark, Teig, Brei, Mus).

Das Viskositätsverhalten der jeweiligen Biere beeinflusst eindeutig das Drainageverhalten und damit den Zerfall der Flüssigkeitslamellen.

### 3.2.1.3. Temperaturabhängigkeit des Viskositätsverhaltens

Eine Temperaturabhängigkeit des Viskositätsverhaltens ergibt sich durch die Veränderung von Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Flüssigkeitsmolekülen bei veränderten Temperaturen. Die Viskosität nimmt bei Flüssigkeiten mit steigender Temperatur ab.

Gase verhalten sich entgegengesetzt aufgrund der Zunahme der Bewegungsenergie der Gasmoleküle.

Für Newton'sche Flüssigkeiten kann die Temperaturabhängigkeit mit Hilfe der Beziehung nach Frenkel-Eyring ausgedrückt werden:

$$\eta(T) = A_s \cdot e^{\left(\frac{E_A}{R \cdot T}\right)} \quad \text{(Gleichung 3.8.)}$$

Die Fließaktivierungsenergie  $E_A$  stellt dabei einen weiteren rheologischen Parameter dar.

#### **3.2.1.4. Einflüsse der Bierinhaltsstoffe auf das Viskositätsverhalten**

Die Schaumstabilität von Bier ist abhängig von Bierinhaltsstoffen, deren Analysenwerte grobe Hinweise auf die Haltbarkeit des Schaums geben, auch ohne diese direkt zu messen (siehe Kap. 3.4.1.).

Im Hinblick auf den Einfluss dieser meist hochmolekularen Verbindungen ist die Betrachtung des zeitlichen Ablaufs des Schaumzerfalls wichtig.

Die Vorgänge wurden hinreichend beschrieben. In der ersten Phase, der Drainage, kann eine hohe Viskosität des Bieres entgegen wirken /9/. Hochmolekulare Verbindungen, wie Proteine,  $\alpha$ - und  $\beta$ -Glucane sowie oberflächenaktive Substanzen erhöhen die Viskosität des Bieres.

Eine hohe Viskosität tritt nicht nur der Drainage entgegen, sondern verhindert durch den dickeren Flüssigkeitsfilm zwischen den Blasen ein schnelles Zusammenstoßen. Das Viskositätsverhalten als Funktion der Temperatur deutet bereits auf die Temperaturabhängigkeit der Messung hin.

Die Dichte des Bierschaums steht in direkter Beziehung zur Konzentration hochmolekularer Verbindungen, wobei jedoch zwischen Schaumdichte und dessen Haltbarkeit keine Korrelation gezeigt werden kann. Ein cremiger, feinporiger Schaum kann schneller zerfallen als ein grobblasiger.

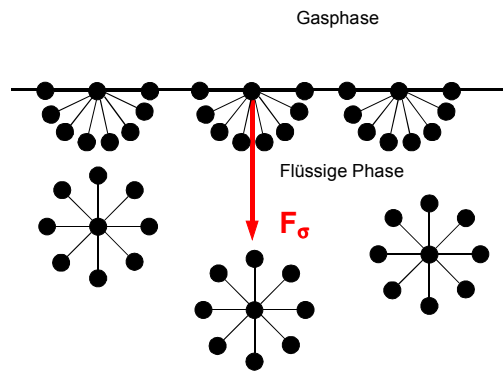
Durch den Ablauf von Flüssigkeit und die Gruppierung in Dreierkonfiguration mit unterschiedlichen Druckverhältnissen kommt es zur Entstehung immer größerer Blasen mit sinkendem Innendruck und dünneren Blasenwandungen. Dies führt zum Zerplatzen großer Blasen an der Oberfläche der Schaumkrone /9/.

#### **3.2.1.5. Oberflächenspannung**

Bei verfahrenstechnischen Vorgängen, unter anderem auch beim Schäumen, sind die Vorgänge an den Grenzflächen von Stoffen von elementarer Bedeutung.

Im Innern einer ruhenden Flüssigkeit wird ein Flüssigkeitsteilchen von seinen benachbarten Teilchen mit den gleichen Kohäsionskräften allseitig angezogen. Da diese Kräfte im Gleichgewicht sind, zeigt sich keine unmittelbare Wirkung.

Liegt ein Flüssigkeitsteilchen aber an der Grenzfläche zur Luft oder einem anderen Gas, richten sich die Anziehungskräfte in Richtung der Flüssigkeit, da die Anziehungskräfte der Luft vernachlässigbar klein sind. Die nach innen gerichteten Kohäsionskräfte versuchen die Oberfläche der Flüssigkeit so klein wie möglich zu halten. Es ergibt eine Verspannung der Flüssigkeit an der Oberfläche zu einer „Haut“.



**Abb. 3.7.: Graphische Darstellung der Oberflächenverspannung**

Deutlich wird dies beispielsweise bei der Bildung von Tropfen, da sich eine kugelige Form ausbildet und somit ein maximales Volumen in Bezug auf die Oberfläche eingeschlossen wird.

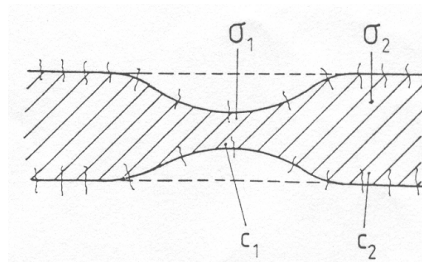
An der Oberfläche wirken Kräfte, welche die freie Oberfläche zu einer Haut verspannen. Es besteht eine Temperaturabhängigkeit, analog zur dynamischen Viskosität  $\eta(T)$  und der Dichte  $\rho(T)$ . Es gilt somit:

$$\sigma = \sigma(T) = \frac{F}{2l} = \frac{h \cdot \rho(T) \cdot d \cdot g}{4} \quad \text{(Gleichung 3.9.)}$$

Wie beschrieben stellt die Schaumbildung eine starke Vergrößerung der Bieroberfläche dar. Oberflächenaktive Substanzen akkumulieren sich im Bereich der vergrößerten Oberfläche der Lamelle des Bierschaums.

Aus diesem Verhalten wird ein weiterer schaumstabilisierender Faktor deutlich, der Gibbs-Marangonie-Effekt, welcher sich durch einen schnellen Fluss oberflächenaktiver Substanzen innerhalb des Flüssigkeitsfilms im Sinne eines Konzentrationsausgleichs ergibt.

Bevor eine Lamelle platzt wird der Flüssigkeitsfilm lokal eingebuchtet, wodurch sich eine Oberflächenvergrößerung ergibt [2]. Die Oberflächenvergrößerung führt automatisch zu einer Verminderung der Konzentration oberflächenaktiver Substanzen in diesem Bereich. Die sich ergebende Differenz wird dadurch ausgeglichen, dass sofort Flüssigkeit zur Einschnürung fließt und so zu einer Stabilisierung der Lamelle beiträgt. Der Schaumzerfall wird durch diesen Vorgang verlangsamt, da sich das Platzen der Lamelle verzögert [2].



**Abb. 3.8.: Gibbs-Marangonie-Effekt zur lokalen Stabilisierung der Blasenwand**

Die Oberflächenspannung ist definiert als jene Arbeit, die notwendig ist, die Oberfläche einer Flüssigkeit um einen Quadratmeter zu erhöhen /10/.

Da die Schaumbildung eine Vergrößerung der Oberfläche bedeutet, wird der Zusammenhang klar. Eine Verminderung der Oberflächenspannung erleichtert die Schaumbildung. Es muss weniger Arbeit geleistet werden, um die Oberfläche entsprechend zu vergrößern und den Schaum zu bilden.

Unterstützt wird dies durch zwei weitere Faktoren:

1. Oberflächenelastizität

Die Fähigkeit der Lamelle verschiedensten Krafteinwirkungen durch ein quasi Festkörperverhalten zu widerstehen

2. Oberflächenviskosität

Die Stärke der Kohäsion zwischen den Molekülen auf dem Oberflächenfilm des Getränks.

Damit kann Bierschaum als quasi „viskoelastisches Material“ mit hoher Zerfallskinetik (idealisiert nach Maxwell) klassifiziert werden.

Entsprechende Versuche hinsichtlich des Einflusses der Oberflächenspannung auf die Schaumhaltbarkeit wurden von Loitsch, Seidel und Bärwald /10/ durchgeführt.

Dabei werden folgende Gleichungen zur Beschreibung der Schäume eingeführt:

Oberflächenspannungszahl:

$$O_i = O_w - O_i \quad \text{(Gleichung 3.10.)}$$

Schaumzahl 1:

$$S_1 = \frac{V_s}{O_i} \quad \text{(Gleichung 3.11.)}$$

Schaumzahl 2:

$$S_2 = t_H \cdot \sqrt{V_m} \quad \text{(Gleichung 3.12.)}$$

Die Kennzahlen  $O_1$ ,  $S_1$  und  $S_2$  dienen zur Beschreibung der Gesetzmäßigkeiten der Schaumstabilität. Deutlich wird insbesondere in Gleichung 3.11. die Abhängigkeit

des Schaumverhaltens von der Oberflächenspannung, welche auch bei der Bierschaummessung eine bedeutende Rolle spielt.

#### **3.2.1.6. Dichte**

Die Dichte des Bieres gibt keinen qualitativen Hinweis auf die Schaumstabilität. Biere geringer Dichte (Schankbiere) können eine höhere Schaumstabilität zeigen als Biere höherer Dichte (Bockbiere). Der höhere Gehalt schaumpositiver Substanzen im Restextrakt des Starkbieres wird hinsichtlich der Schaumstabilität durch einen höheren (schaumnegativen) Ethanol-Gehalt kompensiert.

Die Dichte kann einen Aufschluss über die Viskosität des Bieres geben. Biere einer höheren Dichte besitzen in der Regel eine höhere Viskosität.

Die Dichteunterschiede sind als gering zu betrachten, da sich verschiedene Stoffe, welche in nennenswerten Anteilen im Bier enthalten sind, sich in ihrer Wirkung auf die Dichte als Stoffkennwert gegensätzlich auswirken.

**Tab. 3.2.: Auswirkungen größerer Substanzklassen auf die Dichte des Bieres**

| <b>Substanzklasse</b> | <b>Auswirkungen auf die Dichte bei 20 °C</b> |
|-----------------------|----------------------------------------------|
| Wasser                | 0                                            |
| Alkohole              | ↓                                            |
| CO <sub>2</sub>       | ↓                                            |
| Restextrakt           | ↑                                            |

0 = keine Beeinflussung der Dichte als Stoffkennwert

↓ = Dichte verringernde Wirkung

↑ = Dichte erhöhende Wirkung

Aus Tab. 3.2. wird deutlich, dass zum Beispiel bei einem Bockbier, das mehr Ethanol und Restextrakt enthält, sich die Wirkung der beiden Substanzklasse gegenseitig aufhebt.

Zum Restextrakt gehören z. B. auch die schaumpositiven Proteinverbindungen. Dies wird begleitet von einem in der Regel höheren Alkoholgehalt, der sich negativ auf die Bierschaumstabilität auswirkt.

### **3.2.1.7. Gaskomponente**

Die Gaskomponente, mit welcher der Schaum erzeugt wird, ist für dessen Haltbarkeit von entscheidender Bedeutung. Dies wurde bereits bei der Herstellung anderer Lebensmittelschäume angedeutet.

Schäume, welche mit reinem  $N_2$  oder  $O_2$  hergestellt werden, sind deutlich haltbarer als  $CO_2$ -Schäume. Begründet ist dies durch die unterschiedliche Löslichkeit der Gase in der Flüssigkeit. Sauerstoff scheidet als Gaskomponente des Bieres aus, da dies zu einer sofortigen Oxidation bestimmter Inhaltsstoffe führen würde, was eine deutliche Geschmacksbeeinträchtigung zur Folge hätte.

Zum Einsatz als Treibgas beim Bierausschank eignen sich nur Inertgase ( $CO_2$ ,  $N_2$ ) und deren Mischungen. /11/

### **Eigenschaften von $CO_2$**

Wie beschrieben erfolgt das Aufschäumen von Bier, je nach angewandtem Messverfahren mit biereigenem oder bierfremdem Kohlendioxid.

Wird bierfremde  $CO_2$  eingesetzt, hat die Reinheitsklasse mögliche Auswirkungen auf den zu erzielenden Messwert. Insbesondere der Gehalt an Fetten und Ölen ist von entscheidender Bedeutung.

Die Hersteller technischer Gase bieten verschiedene Klassen an, welche von einem Reinheitsgrad von 99,7 % bis zu 99,9999 % /12/ reichen. Für die Anwendung zur Schaummessung mit direktem Probenkontakt (Ross & Clark-Methode) hat sich gezeigt, dass ab einer  $CO_2$ -Konzentration von  $> 99,995$  % keine Veränderung der Messwerte mehr auftritt. Entsprechend wird dieser Reinheitsgrad für die gesamten Schaummessungen in dieser Arbeit benutzt.

Kohlendioxid wird in der Lebensmittelproduktion für eine Vielzahl technologischer Vorgänge benutzt, z.B. als Extraktionsmittel. Im Vordergrund steht die Eigenschaft eines Inert-Gases, welches nicht oder nur unwesentlich mit den Inhaltsstoffen der Lebensmittel reagiert. Der Oxidationsschutz ist eines der Hauptziele bei der Verwendung von  $CO_2$ . Gleiches gilt für die Verwendung von  $N_2$ .

Wie erwähnt sind mit Stickstoff hergestellte Schäume deutlich haltbarer als  $CO_2$ -Schäume.

**Tab. 3.3.: Chemisch-physikalische Eigenschaften von CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> /13/**

|                                                       | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-------------------------------------------------------|-----------------|----------------|
| Molmasse [g]                                          | 44,01           | 28,01          |
| Dichte, gasförmig (15 °C, 1 bar) [kg/m <sup>3</sup> ] | 1,85            | 1,17           |
| Relative Dichte zur Luft (Luft = 1)                   | 1,53            | 0,97           |
| Löslichkeit in Wasser (20 °C, 1 bar) [mg/l]           | 1500            | 20             |

Insbesondere die wesentlich höhere Löslichkeit von Kohlendioxid im Vergleich zum Stickstoff fällt auf. An dieser Stelle muss hinsichtlich des Begriffes „Inert-Gas“ in Verbindung mit Wasser eine Einschränkung getroffen werden.

Die Bildung von Kohlensäure (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) stellt eine Reaktion von Wasser und Kohlendioxid dar. Hinsichtlich dessen können die Gesetze von Henry und Dalton für CO<sub>2</sub> auch nur näherungsweise Anwendung finden, da diese darauf beruhen, dass das Gas nicht mit der Flüssigkeit reagiert. /14/ Die Bindung von CO<sub>2</sub> in Bier ist somit nicht nur physikalischer, sondern auch chemischer Natur (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) /15/.

### **3.2.1.8. Dalton- und Henry-Gesetze für ideale Systeme**

#### **Dalton'sches Gesetz**

Das Dalton'sche Gesetz besagt, dass der Partialdruck  $p_i$  einer Komponente  $i$  in einem Gasgemisch dem Produkt aus dem Molanteil  $y_i$  multipliziert mit dem Gesamtdruck  $p$  entspricht:

$$p_i = \sum y_i p_{ges} \quad \text{(Gleichung 3.13.)}$$

Das Dalton'sche Gesetz gilt in dieser Form nur für ideale Gase.

#### **Henry'sche Löslichkeitskonstante**

Das Adsorptionsverhalten von Gasen in einer Flüssigkeit wird von drei verschiedenen Faktoren beeinflusst:

##### **1. Chemische Reaktivität von Gas**

Wenn das Gas in der Lage ist mit der Flüssigkeit zu reagieren, ist die Löslichkeit entsprechend groß (HCl, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> in Wasser). Dass es zu einer Lösung kommt, ist durch verschiedene Kräfte begründet. Einerseits tritt die Lösung durch Dipol – induziertes Dipol, andererseits durch disperse Kräfte ein. Diese Kräfte machen es möglich, dass sich auch Edelgase (Helium) in einem bestimmten Verhältnis lösen.

## 2. Druck

In einem gegebenen Volumen Bieres löst sich mit steigendem Druck eine immer größer werdende Menge von CO<sub>2</sub>. Henry stellte empirisch fest, dass bei Systemen, deren Komponenten nicht miteinander reagieren, die Löslichkeit eines Gases bei einer gegebenen Temperatur dem Partialdruck dieses Gases über der Flüssigkeit direkt proportional ist /16/.

Die Löslichkeit eines Gases in einer Flüssigkeit ist somit von der Anwesenheit anderer Gase vollkommen unabhängig. Bei vorgegebener Temperatur hängt diese nur von dem entsprechenden Gas ab.

Der beschriebene Sachverhalt lässt sich in folgender Beziehung zusammenfassen:

*Menge des Gases i in der Lösung = Konstante  $p_i$*  **(Gleichung 3.14.)**

Zur Berechnung der Henry-Konstante ( $H_i$ ), welche die Löslichkeit eines Gases in der Flüssigkeit beschreibt, wird die Löslichkeit als Molenbruch ausgedrückt /16/:

$X_i = k_i p_i$  bzw.  $p_i = H_i X_i$  **(Gleichung 3.15.)**

## 3. Temperatur

Im Unterschied zur Lösung fester Substanzen in einer Flüssigkeit ist die Lösung von Gasen ein exothermer Prozess. Die Gaslöslichkeit nimmt bei konstanten Druck und steigender Temperatur ab. Deshalb kann die Entgasung von Flüssigkeit auch durch Erwärmung durchgeführt werden /16/. CO<sub>2</sub> ist verglichen mit N<sub>2</sub> im Hinblick auf die Schaumstabilität als ungünstigere Gaskomponente zu bezeichnen, was durch die unterschiedliche Löslichkeit begründet ist (Kap. 3.1.).

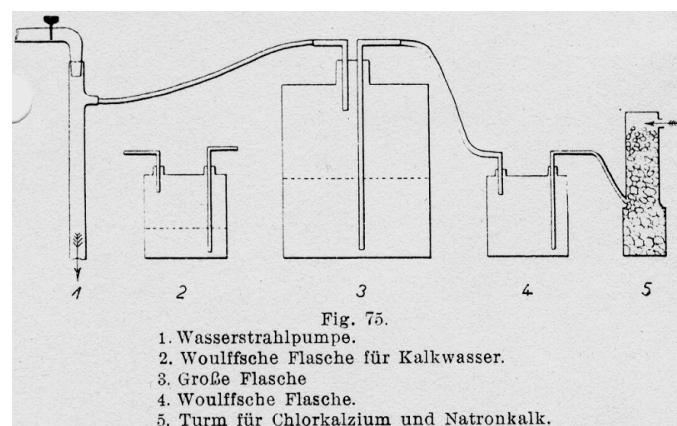
### 3.3. Die Geschichte der Schaummessung

Die Qualitätssicherung in der Brauerei gewann mit Beginn industrieller Bierherstellung an Bedeutung. Als einer der Qualitätsparameter wurde früh der Bierschaum erkannt, welcher nach Windisch /17/ negative Auswirkungen auf Brauereien haben kann: „Mangel an Schaumbildung und insbesondere Schaumhaltbarkeit des Bieres ist eine Kalamität, die erstlich gar nicht so selten ist, dann sehr oft gar nicht so leicht behoben werden kann und für die betroffenen Brauereien oft sehr unangenehme Folgen haben kann.“

Probleme der Schaumhaltbarkeit waren bereits Ende des 19. Jahrhunderts bekannt, Methoden zur Untersuchung jedoch nicht in die Praxis eingeführt. Die zeitgemäße Literatur sowie in den ersten Sammlungen von Analysenvorschriften, wie z.B. die

„Vereinbarungen zur Untersuchung und Beurtheilung von Bier“ (Mansfeld, 1881) /18/ und eine Veröffentlichung aus dem Jahr 1913 „Das moderne Brauereilaboratorium“ beinhalten keine Methode zur Messung der Schaumhaltbarkeit /18/.

Im gleichen Jahr beschreibt jedoch Fürnrohr /19/ eine Methode, bei welcher der Schaum durch Einleiten von Gas erzeugt wird. Die Beurteilung erfolgt durch Beschreibung des Schaumverhaltens /20/.



**Abb. 3.9.: Versuchsaufbau nach Fürnrohr /19/**

Die Induktion des Schaums erfolgte durch die Einleitung CO<sub>2</sub>-freier Luft in eine schaumfrei eingeschenkte Biervorlage. Der Gasstrom, verbunden mit Schütteln des Gefäßes, führt zu einer Kohlendioxidentbindung.

Durch Fällungs- und Aussalungsreaktionen isoliert Fürnrohr zwei verschiedene Eiweißfraktionen. Deren Gehalt in verschiedenen Bieren und ein rein qualitativer Vergleich mit der Schaumhaltbarkeit macht deutlich, dass Eiweißstoffe einen entscheidenden Einfluss haben.

1916 wurde erstmals eine Methode postuliert, in der die Angabe von Zahlenwerten als Messergebnis diene. Heuss schüttelte das Bier in graduierten 100 ml-Flaschen und bestimmte die Schaumhöhe nach verschiedenen Zeiten.

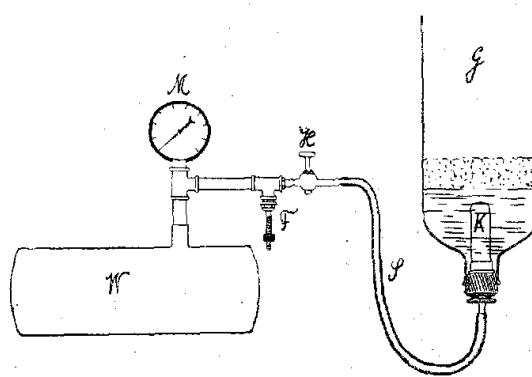
Baker und Hulton überführten eine definierte Menge Bier mittels einer standardisierten Einrichtung in ein Gefäß bekannter Ausdehnung /21/. Nach Einleiten des Bieres aus bekannter Höhe wird die benötigte Zeit gemessen, bis sich auf der Oberfläche eine klare, blasenfreie Stelle gebildet hat. Im gleichen Jahr entwickeln Windisch und Bermann eine Methode, bei der sie durch Schütteln den Schaum entwickeln /22/.

Die bis zu diesem Zeitpunkt entwickelten Methoden zeigen, auf welchem Wege der Schaum gebildet wurde:

- Einleitung von Gas
- durch Schütteln
- durch freien Fall einer Flüssigkeit

Die Beurteilung der Schaumhöhe nach 2 Stunden ist das Messprinzip der Methode von Rask /23/. Windisch, Kolbach und Banholzer verglichen Biere, welche mittels einer Schüttelmaschine aufgeschäumt werden, mit einem Referenzbier, dessen Schaumeigenschaften bekannt sind /24/. Durch maschinelle Schaumerzeugung können Einflüsse, welche durch unterschiedliche Schüttelintensitäten entstehen, ausgeschlossen werden.

Lüers und Schmal entwickeln eine Methode, in welcher entgastes Bier durch Einleiten von Luft aufgeschäumt wird /25/. Weitere Untersuchungen von Modelllösungen wurden durchgeführt.



**Abb. 3.10.: Versuchsaufbau nach Lüers und Schmal**

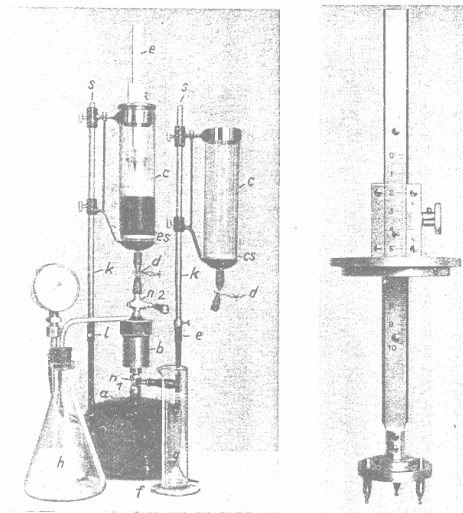
Das definierte Volumen des Windkessels (W) macht es möglich durch das Ablassen einer bestimmten Gasmenge - mittels eines Startdrucks (3 bar) und Enddrucks (2,8 bar) - durch die Sinterkerze (K) im Bier, welches im Probengefäß (G) entgast vorgelegt wurde, durchzuleiten und den Schaum zu erzeugen /25/.

Angaben über eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse werden nicht gemacht. Eine Überprüfung durch Geys zeigte, dass die Entgasung vor der Schaummessung nachteilig ist, jedoch in Extremfällen gute Werte durch die Analyse geliefert werden /26/.

Ein Vergleich der bisher entwickelten Methoden wurde durch Kutter (1928) durchgeführt. Aus den gesammelten Erfahrungen entwickelte er eine Methode, bei der Bier in eine evakuierte Bürette eingeschenkt und die Schaumhöhe nach 2 bzw.

10 Minuten festgestellt wurde. Aus den Messwerten wird eine Kenngröße errechnet, welche den Bierschaum charakterisieren soll.

Aufbauend auf der Methode von Lüers und Schmal modifiziert Wieneringer /27/ den Versuchsaufbau durch Einbau einer Glasfilterplatte zur Lufteinleitung. Zur Messung verwendet er eine Messlehre zur Feststellung der Schaumhöhe. Weiterhin wird das Schaumvolumen nach definierten Zeiten bestimmt, die enthaltene Biermenge wird berechnet. Insgesamt werden in einer Messung 18 Werte bestimmt.



**Abb. 3.11.: Messaufbau nach Wieneringer /27/**

Nach Forderung von Helm /28/ muss die Schaummessung den natürlichen Prozess der Schaumbildung und die Schaumhaltbarkeit widerspiegeln. Aus diesem Grund sollten alle Methoden der Vorbehandlung unterbleiben, da diese das natürliche Gleichgewicht im Bier vor der Schaumbildung stören würden. Helm favorisiert deshalb die Methode der Schaummessung nach Rask, da einzig der freie Fall die wahren Verhältnisse wiedergäbe. Helm /28/ schlägt vor, durch eine einfache Apparatur das Bier in einen Scheidetrichter fallen zu lassen. Aus diesem sei nach 2 bzw. 10 Minuten die zurückgebildete Biermenge abzulassen, der Restschaum wird mit Alkohol niedergeschlagen. Durch vier Berechnungsformeln können Kenngrößen gebildet werden. Helm spricht auch die Umgebungseinflüsse auf den Schaum an, eine Quantifizierung dieser Einflüsse erfolgt jedoch nicht, bzw. die Werte sind nicht auf heutige Maßstäbe übertragbar. Wegen des geringen apparativen Aufwands und der leichten Auswertung der Ergebnisse war diese als „Carlsberg-Methode“ bekannte Analysenvorschrift weit verbreitet.

Wiederum können die bisher vorgestellten Methoden in verschiedene Kategorien hinsichtlich der Ergebnisse eingeteilt werden:

1. Qualitative Beschreibung der Ergebnisse
2. Ermittlung von Zahlenreihen
3. Bestimmung einer Kennzahl, welche aus Messwerten errechnet wird

Eine mathematische Beschreibung des Schaumzerfalls wird durch Blom & Prip /29/ eingeführt, nach ihrer Annahme beruht der Zerfall auf einer Reaktion erster Ordnung, so dass die Halbwertszeit eine geeignete Kenngröße darstellt.

Die vorgeschlagene Methode beruht auf dem Einleiten von  $\text{CO}_2$  in das Bier. Abweichend von den bisher beschriebenen Methoden wird jedoch der Schaum nicht volumetrisch gemessen, sondern gewogen.

Die Ermittlung von zwei Verhältniszahlen ist Kern der Methode nach Schwarz und Laufer /30/, das Schaumgewicht nach 5 bzw. 10 Minuten Zerfallszeit wird zum ursprünglichen Schaumgewicht ins Verhältnis gesetzt.

Schuster und Mischke /20/ setzen zur Schauminduktion eine katalytische Methode ein, indem sie Glaspulver zur  $\text{CO}_2$ -Entbindung ins Bier streuen. Aus der Schaumhöhe nach 1 und 10 Minuten wird eine Kenngröße ermittelt. Der mittlere Fehler dieser Analyse liegt bei 4 bis 5 %.

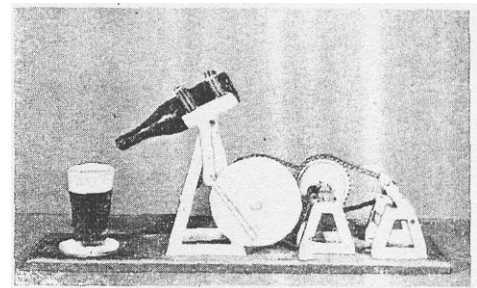
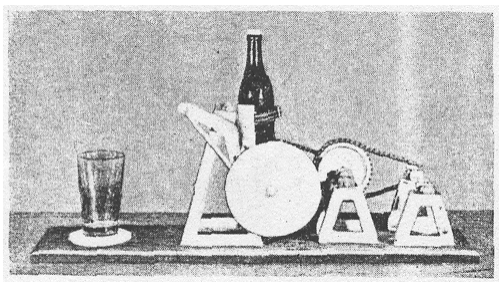
Bikerman /20/ sieht die Schaumfähigkeit von Flüssigkeiten als eine physikalische Konstante an, ähnlich wie Refraktion oder Dichte. Er kommt zu dieser Annahme, weil er seine Untersuchungen anhand einer Flüssigkeit durchführt, durch die ständig  $\text{CO}_2$  strömte. Es ergab sich eine maximale Schaumhöhe, welche sich durch weiteres Einleiten von Kohlendioxid nicht erhöhte. Die Einstellung eines Gleichgewichts zwischen Blasenbildung und Zerfall führte zu dieser Annahme. Das Ergebnis der Berechnungen von Bikerman wurde als mittlere Lebensdauer einer Schaumblase angegeben. Eine Übertragung der Ergebnisse auf Bier aber war nicht möglich.

Ross und Clark publizierten ihre Methode 1939 /31/. Die Methodenentwicklung von Ross und Clark bezieht sich nicht nur auf Bier, sondern auch auf andere  $\text{CO}_2$ -haltige Getränke und nicht-karbonisierte Flüssigkeiten (siehe Kap. 3.6.2.)

Ein Vergleich der Methode mit denen von Helm (Carlsberg-Methode, /28/) und Blom und Prip /29/ zeigt, dass die Ergebnisse miteinander korrelieren. Ross und Clark sind der Meinung, dass die bisher genannten Messmethoden der Schaumhaltbarkeit mit den empirisch ausgedrückten Messergebnissen durchaus in  $\Sigma$ -Werte umgerechnet werden können.

Hartong stellt den  $\text{CO}_2$ -Gehalt im Bier in den Mittelpunkt seiner Arbeit. Auf den Kohlendioxidgehalt im Bier haben seiner Meinung nach neben Heferasse und vergärbarem Extrakt noch andere Faktoren wie z.B. die Gefäßgeometrie einen Einfluss /32/. Ebenfalls untersucht Hartong die Schaumuntersuchungsmethoden von Helm und Blom, wobei er zu der Ansicht kommt, dass diese Methoden zwar relativ genau sind, jedoch nicht die wahren Verhältnisse, denen der Bierschaum beim Verzehr der Bieres unterlegen ist und damit dem Eindruck auf den Verbraucher, widerspiegeln.

Er strebt eine Analyse an, welche sich stärker an der Praxis orientiert, dazu entwirft er eine Einschenkapparat, die den Vorgang genau nachbilden soll.



**Abb. 3.12.: Einschenkapparat nach Hartong /32/**

Die Messergebnisse werden als prozentuale Angabe eines Standardbieres gemacht. Absolute Messwerte können mittels einer einfachen Formel in  $\Sigma$ -Werte nach Ross und Clark umgerechnet werden.

Erst 1950 beschäftigen sich Brenner et al. mit einer neuen Methode, bei der Bier durch eine Düse in eine Glasröhre eingeleitet wird. Das Volumen zurückgebildeten Bieres wird im Minutentakt gemessen /20/.

Die Verifizierung der Methode nach Ross und Clark sind Kern der Arbeiten von Lienert /33/. Die Konstante, welche Ross und Clark in ihrer Arbeit zwischen der zweiten und fünften Minute des Schaumzerfalls als physikalische Größe definiert haben, kann nicht bestätigt werden. 94 % aller Messungen zeigen ein Fallen der Konstante in den ersten 5 Minuten. Lienert stellt die Forderung nach standardisierten Gerätschaften auf.

Die Diskussion um die Richtigkeit der Annahmen von Ross und Clark wird in den folgenden Jahren noch von verschiedenen Autoren aufgegriffen (Piratzky et al., 1955 /34/; Weiersmüller, 1955 /35/; Rudin, 1957 /36/).

Im Jahr 1957 schlagen De Clerck und De Dyker /37/ eine Methode vor, bei der die Schaumabnahme durch den Einsatz eines Mikroskops ermittelt wird. Die Schaumblasen liegen bei dieser Analyse zweimal im Brennpunkt des Objektivs, welches nach dem ersten Durchlaufen des Brennpunktes um einen Zentimeter gesenkt wird. Der Zeitraum zwischen den beiden Punkten wird gemessen. Ferner müssen 2 Schätzwerte nach 10 Minuten angegeben werden, das Schaumhaftvermögen und die Bedeckung des Bieres mit Schaum.

1966 wurde von Kipphan et al. eine Verbesserung der Methode vorgeschlagen, in welcher der gebildete Schaum mit einer Nylon-Gaze-Scheibe bedeckt wurde, um störende Bewegungsvorgänge an der Schaumoberfläche auszugleichen /38/.

Ebenfalls eine optische Methode wird durch Holmstrom et al. eingeführt. Ein Glasstreifen taucht in den Schaum ein und wird anschließend getrocknet. Unter genormten Bedingungen wird die Reflektion gemessen /39/.

De Clerck stellt fest, dass die Blasengröße und die Schaumhaltbarkeit in klarer Abhängigkeit zueinander stehen, kann diese Tatsache aber nicht von einem Bier auf ein anderes übertragen /20/.

Glenister und Segel /40/ überprüfen die Schaumstabilität durch Zusatz schaumschädlicher Chemikalien wie Trimethylammoniumaromid. Die Menge des Zusatzes wird erhöht bis sich, visuell betrachtet, keine Beschleunigung des Schaumzerfalls einstellt. Weiterhin überprüfen sie die Schaumadhäsion, die Bildung von Ringen an der Glaswandung nach teilweiser Entleerung. Zur standardisierten Entleerung wird das Bier mittels einer Saugflasche abgezogen.

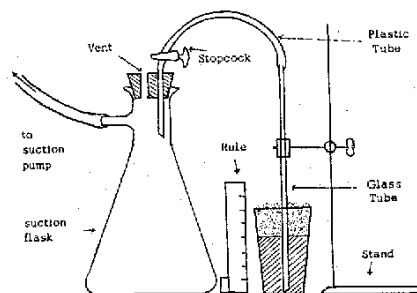
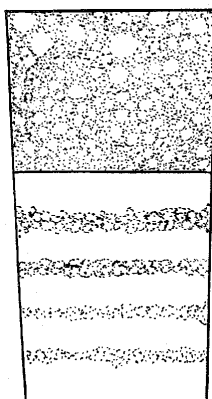


Fig. 1. Sketch of apparatus.

**Abb. 3.13.: Messvorrichtung nach Glenister und Segel /40/**

Nach mehreren Stufen der Entfernung von Bier zeigt sich im Glas folgendes Bild:



**Abb. 3.14.: Schaumadhäsion nach mehreren Stufen der Bierentfernung /40/**

Klopper führte den NIBEM-Apparat zum EBC-Kongress 1973 in Salzburg vor. Die Automatisierung kann als wesentlicher Fortschritt innerhalb der Schaumanalytik bezeichnet werden (siehe Kap. 3.6.3.)

Eine Verbesserung der Schaummessung wurde 1981 durch Rasmussen /41/ beschrieben, der den Schaum durch den Druckabfall beim Durchfluss durch eine Düse induziert. Die Messung erfolgt optisch in einem Glaszylinder. Diese durch das Carlsberg-Institut entwickelte Methode stellt den Prototyp des Lg-Foamtesters dar.

Der Lg-Foamtester hat gegenüber diesem Prototypen einige deutliche Vereinfachungen. Der Prototyp besitzt keine Temperaturkompensation, sondern ist durch die komplette Einhausung gegen Temperatureinflüsse geschützt. Ferner besitzt der Prototyp ein Auto-Sampling, welches die Probe aus Metallbechern einbringt. Eine schaumfreie Überführung der Probe in die Metallbehälter ist ein zusätzlicher Arbeitsschritt. Die Bestimmung des Probenvolumens erfolgt durch eine induktive Durchflussmessung. Im Hinblick auf eine Kostenersparnis wurde dies beim Lg-Foamtester durch eine Zeitsteuerung ersetzt.

Der beschriebene Prototyp wurde nur in der Carlsberg Brauerei in Kopenhagen realisiert. Der Wartungsaufwand und die im großem Maß erforderliche Bedienungsarbeit zeigte, dass eine Serienumsetzung nicht zu verträglichen Kosten möglich war.

Das Gerät ist nach wie vor betriebsbereit, jedoch wird es nicht mehr zur Routineanalytik eingesetzt, da das entsprechende Personal, welche mit den Wartungsarbeiten vertraut ist, nicht mehr zur Verfügung steht.

Die Vergleichbarkeit von Ross & Clark- und NIBEM-Methode war Thema mehrerer Veröffentlichungen, so hat sich Weyh mit der Aussagekraft von Schaumanalysen befasst. Bei großen Messreihen sei die NIBEM-Analyse deutlich aussagekräftiger, die Ross und Clark-Methode scheidet als Referenzmethode aus /42/.

Weyh /43/ versucht mit verbalen Beurteilungen der Schaumqualität eine Korrelation zwischen Ross & Clark – bzw. NIBEM-Messwerten aufzustellen. Es konnte kein statistischer Zusammenhang festgestellt werden.

Piendl und Legat /44/ zeigen bei Vergleich des NIBEM-Systems mit der Ross & Clark-Methode und der nach Schuster und Mischke /45/, dass die relative Standardabweichung bei Ross & Clark am geringsten ist.

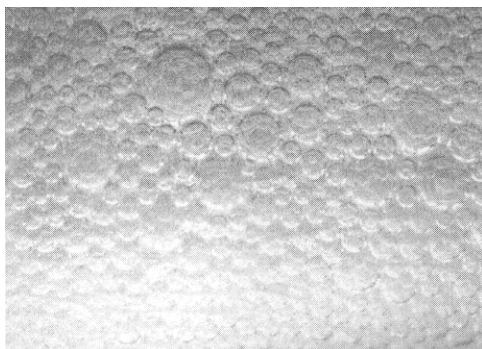
Ein anderer Ansatz zur Bestimmung der Bierschaumstabilität wurde durch die Einführung der Bildanalyse gemacht.

Auf den Einfluss der Blasengrößenverteilung auf die Bierschaumstabilität wurde bereits in Kap. 3.2.1.1. hingewiesen. Dies führte zur Entwicklung eines Systems, welches die Blasengrößenverteilung und deren zeitliche Veränderung mittels einer CCD-Kamera erfasst und EDV-gestützt auswertet.

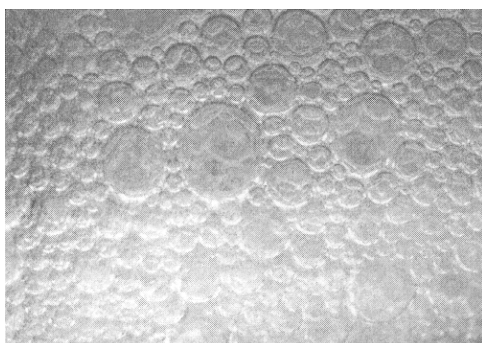
Kurz nach der Schaumbildung ist das Maximum der Blasengrößenverteilung im Bereich kleiner Blasen (Durchmesser  $\sim 0,6$  mm) – relativ homogen – zu beobachten. Mit der fortschreitenden Zeit des Schaumzerfalls ändert sich die Verteilung durch Vorgänge des Schaumzerfalls.

Eine Besonderheit wird durch die Art und Weise der Schauminduktion dargestellt. Das Bier wird durch eine Querschnittsverengung gedrückt (analog NIBEM oder Lg-Foamtester), wobei jedoch ein Ultraschallgeber die Schauminduktion nochmals forciert. So sollen sehr homogene Schäume erzeugt werden.

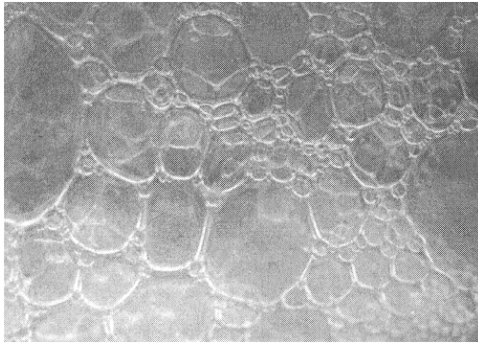
Die Veränderung der Blasengröße innerhalb der Dauer des Bierschaumzerfalls wird in den folgenden Abbildungen gezeigt.



**Abb. 3.15 a.:  
Schaum nach 30 s**

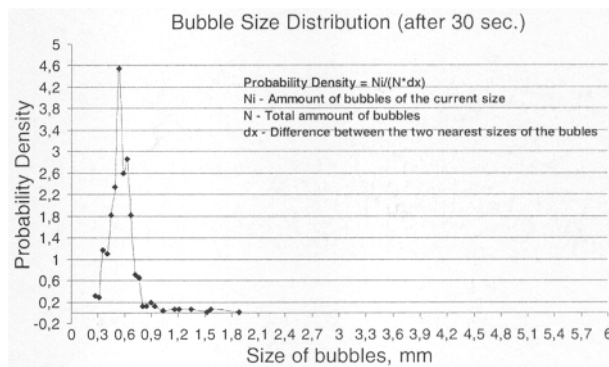


**Abb. 3.15 b.:  
Schaum nach 100 s**

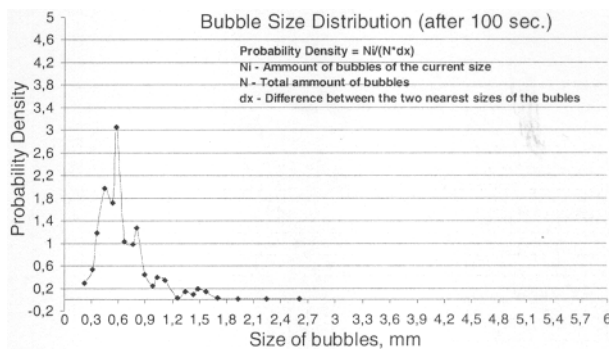


**Abb. 3.15 c.:**  
**Schaum nach 160 s**

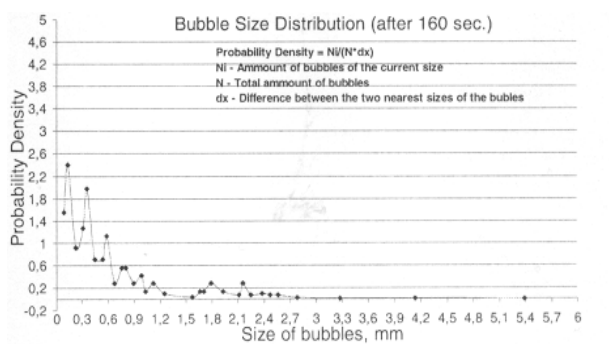
Die Blasengrößenverteilung kann den folgenden Grafiken entnommen werden:



**Abb. 3.16 a.:**  
**Blasengrößenverteilung**  
**nach 30 s**



**Abb. 3.16 b.:**  
**Blasengrößenverteilung**  
**nach 100 s**



**Abb. 3.16 c.:**  
**Blasengrößenverteilung**  
**nach 160 s**

Die Verteilung ändert sich in Richtung größerer Blasen. Die Auswirkungen auf Flüssigkeitsrückbildung oder Abnahme der Schaumhöhe sind in der Beschreibung des Messsystems nicht gemacht. Lediglich die Abnahme der „wahrscheinlichen Schaumdichte“ ist den obigen Grafiken zu entnehmen /46/. Die Einflüsse der Umgebungsbedingungen auf Schaumbildung und -zerfall bleiben unerwähnt. Vergleichende Untersuchungen sind der Veröffentlichung nicht zu entnehmen. Eine konstante Blasengrößenverteilung wird einem stabilen Bierschaum gleichgesetzt. Es ist erforderlich die Veränderungen der Verteilung in einen Zahlenwert umzusetzen, um Vergleiche mit anderen Methoden durchführen zu können.

### **3.4. Chemische und technologische Grundlagen**

Innerhalb der Technologie der Bierherstellung kann auf die chemische Zusammensetzung des Bieres und damit auf das Schaumverhalten deutlich Einfluss genommen werden.

Wie häufig in weitgehend biotechnologischen Prozessen ist der eine oder andere positive Effekt nur durch Zugeständnisse an einen anderen ebenfalls positiven Effekt zu erreichen. Hinsichtlich verschiedener Interessen im Bereich der Bierherstellung, den gewünschten Qualitätsparametern und den Haltbarkeitseigenschaften müssen oftmals Konzessionsentscheidungen getroffen werden.

Die folgenden Abschnitte sollen eine Übersicht über verschiedene der genannten Aspekte geben.

#### **3.4.1. Bierinhaltsstoffe**

Zum Einfluß der verschiedenen Bierinhaltsstoffe auf die Bierschaumstabilität wird in einer Vielzahl von Literaturstellen diskutiert. Exemplarisch sei die Veröffentlichung von Morris aus dem Jahr 1984 gewählt. Morris sieht sechs verschiedene Bierinhaltsstoffe als die Hauptfaktoren einer mehr oder weniger guten Bierschaumstabilität an /47/:

#### **Schaumpositive Substanzen:**

##### **1. Proteine**

Die Proteine, welche eine schaumpositive Wirkung mit sich bringen, werden in der Literatur als „hochmolekular“ bezeichnet. Eine genaue Angabe, welche Molekulargewichtsfraction die eigentlich bestimmende ist, kann den verschiedenen Literaturstellen nicht eindeutig entnommen werden.

Sicher hingegen ist, dass die Fraktion des  $\text{MgSO}_4$ -fällbaren Stickstoffes (Molekulargewichte von mehr als 5 kDa) gut mit der Schaumhaltbarkeit korreliert.

Ebenfalls positiv auf den Schaum wirkt sich ein hoher Gehalt koagulierbaren Stickstoffs aus, diese Fraktion kann durch den Verfahrensschritt des Würzekochens wesentlich beeinflusst werden (Abb. 3.17).

Niedermolekulare N-Verbindungen, wie zum Beispiel FAN, tragen zu einer Verschlechterung der Bierschaumhaltbarkeit bei.

Hinsichtlich der Proteine ist allerdings festzustellen, dass die Molekulargewichtsfraction, welche für die Schaumstabilität in Hauptsache verantwortlich ist, kontrovers diskutiert wird. Ferner sind weitere Faktoren wie die Ladung der Proteinmoleküle, die mögliche Verbindung zu Kohlenhydrate (Glycoproteide) und die Hydrophobizität in die wissenschaftliche Betrachtung eingebracht worden /48, 49, 50/.

Ferner sind Ansätze gemacht worden, die Schaumstabilität durch die Verhältnisbildung bestimmter Molekulargewichtsfractionen zu beschreiben /50/.

Die Proteine sind deshalb hinsichtlich ihrer Wirkung differenziert zu betrachten.

## 2. isomerisierte Bitterstoffe

Durch die Isomerisierung zu K-Iso-Humulat werden die Bitterstoffausbeute und damit der Anteil oberflächenaktiver Substanzen im Bier erhöht.

## 3. Melanoidine

Diese Substanzen wirken sich positiv auf die Oberflächenspannung des Bieres aus.

## **Schaumnegative Substanzen:**

### 1. Fette und Fettsäuren

Die Wirkung der Lipide und Fettsäuren ist differenziert zu betrachten.

Zürcher berichtet, dass die in normaler Konzentration vorkommenden Monoglyceride die Schaumstabilität eher verbessern, wenn dies Maß überschritten wird, kommt es zu einer Verschlechterung. Erst ab Konzentrationen von mehr als 0,2 ppm, die in Bier „wahrscheinlich nie“ erreicht werden, ist die Wirkung von Fetten und deren Abkömmlingen eindeutig schaumzerstörend /51/.

Klopper untersucht den Einfluss schaumnegativer Bierinhaltsstoffe wie Fettsäuren und deren Schwellenwert. Es zeigt sich, dass langkettige Fettsäuren einen niedrigeren Schwellenwert besitzen.

2. niedermolekulare Stickstoffverbindungen
3. Tenside als Reinigungs- und Desinfektionsmittel

Diese vereinfachte Einteilung in positive und negative Bierinhaltsstoffe zeigt die technologischen Einflussfaktoren als grobe Differenzierung auf, jedoch werden wesentliche Hinweise auf technologische Parameter im Hinblick auf eine Schaumverbesserung des Bieres gegeben /47/.

### **3.5. Technologische Einflussfaktoren auf den Bierschaum**

Eine technologische Einflussnahme auf die Stabilität des Bierschaums ist in der Brauerei in fast allen Prozessschritten mit mehr oder minder großen Auswirkungen möglich. Dies beginnt bei der Rohstoffauswahl und geht bis hin zu zahlreichen mechanischen Trennprozessen.

Die schaumpositiven Bierinhaltsstoffe sind in ihrer Wirkung beschrieben worden. Eine Übersicht über die Möglichkeiten gibt Runkel /52/ in seiner Arbeit von 1976.

Für die Haltbarkeit des Bierschaums werden auch hier die Proteine in den Vordergrund gestellt. Eine Vielzahl von technologischen Schritten bringt eine Reduzierung hochmolekularer Eiweiße mit sich.

#### **3.5.1. Rohstoffauswahl**

Bei der Untersuchung verschiedener Gerstensorten wird eine unterschiedliche Schaumhaltbarkeit gefunden. Eine mögliche signifikante Sortenabhängigkeit besteht. Aufeinander folgende Untersuchungen von gleichen Gerstensorten aus verschiedenen Jahrgängen bestätigen diese Ergebnisse nicht. Folglich besitzen der Jahrgang und die Bedingungen während der Vegetationsphase einen Einfluss auf die Schaumeigenschaften des Bieres /52/.

Wintergersten weisen höhere Eiweißgehalte auf als Sommergersten, der Schaum bei Bieren aus Wintergerste ist als stabiler zu bezeichnen.

Der Einfluss des Eiweißgehaltes der Gerste wird durch die Versuche von Narziß und Röttger /53/ bewiesen, die Gersten unterschiedlicher Eiweißgehalte (9,5; 11,5 und 13 %) vermälzten und in den Bieren steigende Schaumzahlen nach Ross & Clark (110; 125; 128) erreichten. Sommer stellte Biere aus Gersten mit 9,1 bzw. 13,0 % Eiweißgehalt her und verifizierte durch die  $\Sigma$ -Werte nach Ross & Clark das Ergebnis von Narziß und Röttger /67/.

Eine Untersuchung der Eiweißfraktionen in den Bieren zeigte, dass der Gehalt an  $\text{MgSO}_4$ -fällbarem und koagulierbarem Stickstoff Ursache für die Verbesserung des Schaums war.

Untersuchungen von Schildbach zeigten, dass die Art und Weise der Gerstendüngung ursächlich für die Unterschiede im Eiweißgehalt waren /54/.

Zuchtziel neuerer Gerstensorten ist ein geringerer Eiweißgehalt, verbunden mit einer schnelleren möglichen Cytolyse und einem höheren Enzympotential. Eine hohe Enzymaktivität bewirkt eine schnellere Cytolyse, was sich aber auch auf die Proteolyse auswirkt. Der Abbau hochmolekularer Proteinfractionen wirkt sich unmittelbar auf den Schaum aus.

Als wichtiges Phänomen ist die Gushingneigung des Bieres zu nennen. Gushing oder das „Wild werden“ des Bieres kommt durch die spontane Gasentbindung bei Druckverlust zustande. Eine der Ursachen für Gushing liegt im Schimmelbefall des Malzes mit Pilzen der Gattung *Fusarium* /55/.

Neuste Ergebnisse zeigen, dass ca. 50 % der Proteinverbindungen im Bier aus dem Lipid-Transfer-Protein 1 (Molekulargewicht ~ 9 kDa) stammen. Dieses Molekül aus der Fraktion der Gerstenalbumine, erfährt bei der Bierherstellung eine Reihe von strukturellen Veränderungen. Führend dabei ist die Maillard-Reaktion. Dieser Vorgang verbessert die schaumpositive Wirkung der sich bildenden Substanzklasse der Melanoidine.

Die Denaturierung der Proteine dieser Substanzklasse ist auf eine thermische Aufspaltung der Disulfid-Brücken zurückzuführen. Von den Autoren wird deshalb eine geringe thermische Belastung bei der Malz- und Bierbereitung gefordert /56/.

### **3.5.2. Mälzung**

Der wesentliche Schritt innerhalb des Mälzungs Vorganges wird durch die Keimung dargestellt. Innerhalb dieses Vorganges laufen die cytolytischen und proteolytischen Lösungsvorgänge hauptsächlich ab. Grundsätzlich soll die Lösung so weit geführt werden, dass sich eine einfache Verarbeitung des Malzes im Brauprozess anschließt. Negative Folgen für die Bierqualität sollen sich jedoch nicht ergeben.

Die Parameter, welche innerhalb der Keimung verändert werden können sind Weichgrad (Wassergehalt des Keimguts), Temperatur, Luftführung (CO<sub>2</sub>-Gehalt im Haufen) und Keimdauer.

Die Mälzung sollte so verlaufen, dass keine proteolytische und cytolytische Überlösung des Malzes entsteht. Beides hat durch die Herabsetzung des Gehalts hochmolekularer Substanzen negative Folgen für die Schaumstabilität.

Eine weitgehende Proteolyse wirkt sich jedoch im Hinblick auf die nicht-biologische Stabilität positiv aus.

Die Herabsetzung des Weichgrades und die Verkürzung der Keimzeit stellen Gegenmaßnahmen zur Überlösung des Malzes dar, gleiches gilt für einen höheren Rückluftanteil in der Haufenluft (erhöhter CO<sub>2</sub>-Gehalt).

Narziß und Kunz zeigen, dass die Schaumhaltbarkeit bei einem Weichgrad von 40 % gegenüber Malzen mit einem Weichgrad von 44,5 % zunimmt.

Ein niedrigerer Weichgrad bringt jedoch eine knappere Cytolyse mit sich. Im Hinblick auf die spätere Filtration, welche durch die Cytolyse (wegen der viskositätserhöhenden Wirkung) negativ beeinflusst werden kann, muss ein Mittelweg zwischen akzeptabler Schaumstabilität, guter Filtrierbarkeit und langer nicht-biologischer Haltbarkeit gefunden werden.

Ein höherer Gehalt an niedermolekularem Eiweiß wirkt sich trotz weitgehend gleicher Anteile höhermolekularer Fraktionen negativ aus /57/.

Die Lösung der Hemicellulose der Zellwände, welche Pentosane und  $\beta$ -Glucane entstehen lässt, beeinflusst durch die Viskositätserhöhung der Würze und des späteren Bieres den Bierschaum positiv /58/. Zur Fraktion der  $\beta$ -Glucane zählen die Moleküle, die ein Molekulargewicht von mehr als 100 kDa besitzen. Nur diese hochmolekularen  $\beta$ -Glucane sind in der Lage die Viskosität zu erhöhen.

Der Einfluss einer knapperen Malzlösung wird von Schild und Lampart unterstrichen, die bei einer Spitzmalzzugabe von 20 % eine Schaumverbesserung beobachten /58/. Die Eiweißgehalte der Biere mit Spitzmalzzugabe und die der Vergleichsbiere waren annähernd gleich. Die Schaumverbesserung ist auf die Erhöhung der Viskosität zurückzuführen.

Durch den Vorgang des Darrens wird die Schaumstabilität erhöht. Schuster et al. führten Versuche mit Schwelkmalz bzw. Darrmalz durch. Der Gehalt an  $\beta$ -Glucanen und Pentosanen war beim Darrmalz geringfügig höher. Die Schaumverbesserung kommt auch hier durch eine Viskositätserhöhung zustande.

Die Behandlung des Grünmalzes mit Gummi arabicum, vorgeschlagen 1968, kann den Schaum um bis zu 10 % verbessern. Das Gummi arabicum wird wenige Stunden vor dem Darren auf das Grünmalz aufgespritzt. Neben den Vorteilen für den Schaum soll dies eine erhöhte Vollmundigkeit und eine verbesserte nicht-biologische Stabilität mit sich bringen.

Die genaue chemische Struktur von Gummi arabicum ist weitgehend unbekannt. Sicher ist hingegen, dass das mittlere Molekulargewicht zwischen 260 und 1.160 kDa liegt. Als Bausteine dienen L-Arabinose, L-Rhamnose, D-Galactose und D-Glucuronsäure. Die Hauptkette besteht aus (1,3)-verknüpften  $\beta$ -D-Galactopyranosylresten. Die Seitenketten sind (1,6)-verknüpft /60/.

Die US-Patentschrift der Kurth Malting Company beinhaltet den Vorschlag dieses Malz zur Herstellung hochqualitativer Biere ausschließlich einzusetzen bzw. Biere „normaler“ Qualität unter möglicher Verwendung größerer Rohfruchtanteile herzustellen. Dies soll wirtschaftliche Vorteile bringen /61/.

### **3.5.3. Würzeherstellung**

Die Herstellung der Würze hat im Bereich der Schaumhaltbarkeit elementare Bedeutung für das Ergebnis im fertigen Bier. Insbesondere der Maischvorgang sowie der Rohfruchteinsatz (Gerste) kann zu einer Verbesserung des Schaums beitragen.

#### **Maischen**

Narziss /59/ postuliert, dass die Verwendung kurzer Maischverfahren mit hohen Temperaturen der Schaumstabilität zuträglich sind. Er schränkt seine Aussage bezüglich der Temperaturoptima der „viskositätsvermindernden“ Enzyme ein. Die Läuterzeit setzt dem Einsatz von Hochkurzmaisverfahren, welche von Windisch vorgeschlagen wurden, Grenzen. Die Läuterzeiten können durch die mangelnde Viskositätsverringung verlängert werden /59/.

Windisch sieht eine Verbesserung des Schaums in der raschen Inaktivierung der proteolytischen Enzyme. Ein Abbau hochmolekularer Proteine durch „Eiweißraster“ in einem Temperaturbereich von 50 bis 52 °C fände nicht mehr statt /62/.

Kolbach und Buse widersprachen diese Annahme als sie nachwiesen, dass die Verbesserung des Schaums nicht durch eine verminderte Proteolyse zustande kam, sondern durch eine höhere Viskosität der Biere infolge kürzerer Gesamtmaiszeiten.

Primär ist für die Viskositätserhöhung die Substanzklasse der  $\beta$ -Glucane verantwortlich. Diese Substanzen neigen unter bestimmten Bedingungen zur Bildung von  $\beta$ -Glucan-Gelen, welche die Viskosität direkt erhöhen.  $\beta$ -Glucane werden durch das Enzym  $\beta$ -Glucan-Solubilase (bis ca. 70 °C) in Lösung gebracht. Die Möglichkeit diese gelösten  $\beta$ -Glucane enzymatisch abzubauen, ist nicht mehr gegeben, da das Enzym Endo- $\beta$ -Glucanase (Temperaturoptimum 45 – 50 °C) bereits inaktiviert ist.

Die Bildung von  $\beta$ -Glucan-Gelen ist jedoch nicht zwangsläufig der Fall, lediglich bei hohem Scherkräfteintrag werden Wasserstoffbrücken zwischen den Molekülen gebildet. Die Streckung der Moleküle bedingt dann eine erhöhte Viskosität.

Der Eiweißabbau vollzieht sich nicht ausschließlich im Temperaturbereich um 50 °C, sondern erstreckt sich über den gesamten Maischprozess. Bei 50 bis 54 °C liegt das Temperaturoptimum der Peptidasen, es werden niedermolekulare Proteine gebildet. Proteasen sind bis in Temperaturbereiche über 70 °C aktiv /63/. Es gilt entgegenzuhalten, dass bei langen Rasten im Bereich von 50 bis 55 °C der Gehalt an Proteinen mit einem Molekulargewicht von mehr als 12 kDa gemindert wird.

Extrem hohe Einmaischtemperaturen, welche Krauß in seinen Untersuchungen einsetzte, führten zu einer erhöhten Lipidextraktion aus dem Malz /64/, unter normalen Umständen erreichen ca. 2% des Malzfettes die fertige Würze. Die erhöhten Fettgehalte in Würzen aus 70 °C-Maischen setzen die Schaumstabilität herab. Bamforth sieht eine Einmaischtemperatur von 63 bis 65 °C als positiv an.

Die Dekoktion hat nach Kolbach und Zastrow keinen Einfluss auf die Schaumhaltbarkeit /65/. Die geringen Unterschiede zwischen Dekoktions- und Infusionsmaischverfahren resultieren aus einer geringen Proteinkoagulation beim Kochen der Teilmaische.

Unmittelbar mit der Temperaturführung des Maischprozesses hängt der Endvergärungsgrad zusammen.

Der folgenden Tabelle ist zu entnehmen, dass ein sinkender Restextraktgehalt ( $\alpha$ -Glucose etc.) mit einer geringeren Viskosität des Bieres verbunden ist. Der scheinbare Endvergärungsgrad steigt an.

**Tab. 3.4.: Einfluss des Endvergärungsgrades auf den Bierschaum /52/**

|                          |      |      |      |
|--------------------------|------|------|------|
| <i>Endvergärungsgrad</i> | 72,8 | 80,3 | 86,2 |
| Viskosität [mPas]        | 1,85 | 1,79 | 1,68 |
| pH                       | 4,55 | 4,59 | 4,62 |
| $\Sigma$ -Wert           | 127  | 120  | 119  |
| <i>Endvergärungsgrad</i> | 68,5 | 82,5 | 86,9 |
| Viskosität [mPas]        | 1,66 | 1,57 | 1,49 |
| pH                       | 4,29 | 4,31 | 4,35 |
| $\Sigma$ -Wert           | 113  | 108  | 104  |
| <i>Endvergärungsgrad</i> | 76,5 | 81,3 | 86,4 |
| $\Sigma$ -Wert           | 127  | 123  | 119  |

Es ist zu folgern, dass je mehr niedermolekulare Verbindungen in der Würze vorhanden sind, desto niedriger werden Viskosität und Schaumwerte (nach Ross & Clark). Ein steigender scheinbarer Endvergärungsgrad wird durch eine Abnahme des  $\alpha$ -Glucan-Gehaltes bedingt. Die Viskosität des Bieres nimmt ab, der Alkoholgehalt steigt an.

Ein Diskussionspunkt ist der pH-Wert der Maische. Narziß /22/ schreibt einem Maische-pH unter 5,5 bzw. einem Würze-pH von unter 5,0 eine negative Wirkung hinsichtlich des Schaums zu. Runkel sieht keinen Einfluss des pH-Werts der Maische /52/. Kolbach und Zastrow führten eine Reihe von Analysen durch, wobei sich keine eindeutige Tendenz zeigte /65/. Der pH-Wert als Verursacher einer guten Schaumstabilität wird von Runkel ausgeschlossen /52/.

Neben den reinheitsgebotkonformen technologischen Maßnahmen steht die Rohfruchtzugabe als Mittel zur Verfügung, die Schaumstabilität zu verbessern.

Der Zusatz von Weizen, Gerste, Sirup, Mais oder Reis /52/ hat unterschiedliche Auswirkungen auf das Schaumverhalten des Bieres. Durch Weizen (Mehl) und Gerste konnte der Schaum mit steigendem Anteil an der Schüttung verbessert werden. Bei der Verwendung von Reis kann diese Aussage nicht bestätigt werden. Negative Veränderungen des Schaums wurden durch Mais bzw. Sirup erreicht. Bei der Herstellung von Brausirupen (welche eine komplexe Mischung verschiedenster Kohlenhydrate darstellen), Maisflakes oder – grits, werden Fettbestandteile in das Halbfertigprodukt übertragen. Diese sind im Endprodukt wieder zu finden. Je höher der Anteil wurde, desto geringer wurden die Schaumzahlen. Es stellte sich dabei heraus, dass es vor allem die schaumschädigenden Lipide sind, die vermehrt in Würze und Bier eingebracht werden /52/.

Die Proteine oder Polypeptide sind als Hauptfaktor der Schaumstabilisierung herausgestellt worden /66/. Die meisten der Malzeiweißstoffe gehen während der Bierherstellung verloren. Ziel der Arbeit war es, dem Bier Polypeptide zuzugeben. Für erste Untersuchungen wurde ein Gerstenprotein isoliert und dem Bier zugesetzt. Auf der Suche nach anderen Proteinquellen wurden Hühnereiweiß, Gluten aus Weizen, Zeanin aus Mais, Milchcasein und Sojaeiweiß in Betracht gezogen. Lediglich die Zugabe von Hühner- und Sojaeiweiß zeigte hervorragende Ergebnisse. Die chemisch-technische und die mikrobiologische Stabilität leidet dabei nicht /66/.

Sommer /67/ ist der Meinung, dass die Schaumstabilität durch Modifikationen des Maischverfahrens durch eiweißseitige Optimierung nur unwesentlich beeinflusst werden kann. Vielmehr sei die richtige Auswahl der Rohstoffe geeignet.

Das Maischverfahren kann die Schaumstabilität durch Viskositätserhöhung, basierend auf einem gesteigerten  $\beta$ -Glucan-Gehalt positiv beeinflussen. Dies wird durch eine Anwendung hoher Einmaischtemperaturen erreicht. Es wird deutlich, dass bei hochgelösten Malzen ab einer Temperatur von 65 °C eine signifikante Erhöhung des  $\beta$ -Glucan-Gehalts zustande kommt /68/. Bei unterlöstem Malz tritt die Erhöhung bei 55 °C ein und setzt sich über 60 und 65 °C fort.

Im Hinblick auf die Filtration ist wichtig, dass sich die Filtrierbarkeit erst ab 65 °C verschlechtert. Diese Ergebnisse werden von Narziß und Litzenburger bestätigt /69/.

### **Läutern**

Läuterwürzen sollten immer so wenig Trübungsstoffe wie möglich enthalten. Die Trübungsstoffe bestehen zu einem großen Teil aus Fetten und Fettsäuren /70/, die durch den Vorgang des „Trübwürzepumpens“ im Treber verbleiben sollen. Versuche, die Läutergeschwindigkeit durch ein Abziehen der Vorderwürze von oben zu erhöhen, wurden durchgeführt, erwiesen sich aber als technologisch nachteilig. Hinsichtlich der Schaumstabilität sind die Nachteile so gravierend, dass diese Innovation wieder verworfen wurde /64/.

Läutergeräte wie Maischefilter älterer Bauart oder Strainmaster liefern trübere Würzen, was sich in einer schlechteren Schaumstabilität niederschlägt /64/. Krauß zeigt, dass ein „mäßiges“ trübes Abläutern keine negativen Auswirkungen auf den Bierschaum hat, dennoch rät er zu einer möglichst blanken Läuterwürze.

Ein höheres Fettsäureniveau weist Morris in Würzen, welche mit Maischefiltern älterer Bauart hergestellt worden sind, nach /47/. Bei Läuterbottichwürzen ist dies nicht der Fall.

Im Hinblick auf ein schnelles Abläutern wird darauf hingewiesen, dass die Viskosität der ablaufenden Würze nicht zu hoch sein darf, da sich der Läutervorgang sonst verlängert. Die Temperatur, welche die Viskosität direkt beeinflusst, darf nicht über einen Wert von 78 °C erhöht werden, da ab dieser Temperatur die Inaktivierung der  $\alpha$ -Amylase folgt, eine Nachverzuckerung im Läuterbottich ist nicht möglich.

Weiterhin führt eine Überschreitung der Temperatur beim Läutern zu einer gesteigerten Fettextraktion, was eine Schaumschädigung verursacht.

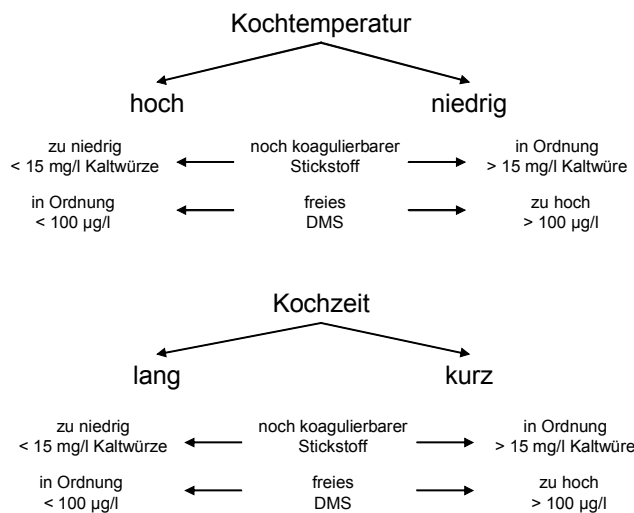
### **Würzekochen**

Auch die Würzekochung hat Einfluss auf die Schaumstabilität des Bieres. In diesem technologischen Schritt wird der Hopfen zur Würze hinzugefügt, dessen Isomerisierung zu Iso-Humulonen (in Kap. 3.3.1. als schaumpositive

Bierinhaltsstoffe genannt) oberflächenaktive Substanzen einbringt. Die ablaufende Koagulation von Eiweiß beeinflusst das Proteinspektrum.

Mit dem Fortschreiten der Kochzeit wird immer mehr koagulierbarer Stickstoff aus der Würze ausgeschieden. Lange Würzekochzeiten und damit einer Abnahme dieser Stickstofffraktion zeigen abnehmende Schaumzahlen. Auch die Kochintensität hat Einfluß; extrem hohe Temperaturen mit kurzer Kochzeit zeigen die gleichen Folgen wie ausgedehnte Kochzeiten bei normalen Temperaturen /68/. Der Optimalbereich des koagulierbaren Stickstoffs liegt zwischen 1,4 und 2,2 mg/100 ml (auf 12 % berechnet) /70/. Höhere Werte würden einer besseren Schaumstabilität entgegenkommen, aber die nicht-biologische Haltbarkeit des Bieres würde negativ beeinflusst.

Eine Herabsetzung der Kochintensität oder der Kochdauer hätte negative Einflüsse auf die chemisch-kolloidale Stabilität des Bieres. Es gilt einen Kompromiss zwischen den Parametern zu finden /70/.



**Abb. 3.17.: Graphische Darstellung der Auswirkungen von Kochintensität und Kochdauer auf den koagulierbaren Stickstoff /72/**

Gegenläufig verhalten sich Kochdauer und -intensität im Bezug auf die Isomerisierung von  $\alpha$ -Säuren. Lange Kochzeiten und hohe Intensitäten verbessern die Bitterstoffausbeute und steigern den Iso-Humulongehalt der Würze und des Bieres /64/. Die Auswirkungen höherer Bitterstoffgehalte auf den Geschmack stellen eine Grenze dar. Ein erhöhter Gehalt an Iso- $\alpha$ -Säuren verbessert den Schaum, hat aber negative geschmackliche Auswirkungen.

Kolbach und Esser zeigen, dass sich Eiweißausscheidung und Isomerisierung von Hopfenbestandteilen in ihrer Wirkung auf den Schaum gegenseitig aufheben /73/.

Die Verwendung eines gerbstofffreien Reinharz-Hopfenextraktes ist vorteilhaft, Doldenhopfen oder Pellets zeigen das Gegenteil. Der negative Einfluss von Polyphenolen wird in der Arbeit von Schilfarth und Sommer deutlich, die Formaldehyd (H-CHO) zur Pfanne-Voll-Würze zusetzten und den Schaum verbessern konnten. Weder die Stickstofffraktionierung noch Veränderungen in der Viskosität wurden nachgewiesen. Der positive Effekt der Formaldehyd Zugabe ist auf die Fällung von Polyphenolen zurückzuführen.

Eine technologische Einflussnahme auf den Schaum kann mit einer mehr oder weniger starken Koagulation von Proteinen erreicht werden.

#### **3.5.4. Würzebehandlung**

Die Entfernung von Kühltrub ist für den Schaum ohne Einfluss /52/. Unkel ist der Meinung, dass es vorteilhaft sei den Kühltrub zu entfernen /70/. Die Frage nach der Methode der Kühltrubentfernung steht im Vordergrund. Die Sedimentation im Anstellbottich wird als die beste angesehen, da bei der Flotation nicht nur Kühltrubteilchen entfernt werden, sondern auch schaumpositive Proteine. Der beschriebene Verlust von Eiweißverbindungen im Brauprozess wird durch die Flotation gesteigert.

#### **3.5.5. Gärung**

Der Einfluss einer stark bzw. weniger stark flockulierenden Hefe auf die Schaumstabilität ist von untergeordneter Bedeutung. Beim Vergleich von Bruch- und Staubhefen hatten die mit Bruchhefe vergorenen Biere einen stabileren Schaum.

Die Hefe besitzt eine Enzymausstattung, welche es ermöglicht, Polysaccharide, auch  $\beta$ -Glucane, zu synthetisieren. Unter normalen Umständen kommt es nicht zu einer Ausscheidung dieser Stoffe, was mittels Untersuchungen in gummistofffreien Nährlösungen nachgewiesen wurde.

Bei falscher Hefebehandlung kann es zu einer Schockexkretion von Protease kommen, die sich durch extrazellulären Eiweißabbau negativ auf den Schaum auswirken.

Die dosierte Zellzahl beim Anstellen hat keinen Einfluss auf die Schaumstabilität. Sommer /74/ zeigte dies bei Hefegaben von 0,5 bis 2,0 l Hefe pro hl Würze. Ebenfalls wurden der Einfluss der Anzahl der Führungen untersucht, bei 20 Führungen blieben Auswirkungen auf den Schaum aus.

Untersuchungen spezieller Verfahren, zum Beispiel die Rührgärung, blieben ohne Ergebnis /52/.

Die ersten Stadien der Gärung sind für den Schaum von großer Bedeutung. Je langsamer die Extraktabnahme in den ersten 24 h nach dem Anstellen, desto besser ist der Bierschaum. Der Grund für den beeinträchtigten Schaum liegt in der schnelleren Abnahme des pH-Werts und stärkeren Ausscheidung schaumpositiver Stoffe (Stickstoffverbindungen) /70/.

Für die Angärung ist der physiologische Zustand der Hefe entscheidend. Eine lange Lagerungsphase unter Wasser oder Bier veranlasst die Hefezelle, ihre Reservestoffe anzugreifen, nach einem erneuten Anstellen ist die Hefe gezwungen, zunächst die verbrauchten Reservestoffe wieder zu synthetisieren bzw. ihre intrazellulären Speicher aufzufüllen. Die Adaptionsphase, nach der die Hefe die Vermehrung beginnen kann, wird verlängert.

Eine zügige Angärung mit einer Hefe in gutem physiologischen Zustand ist Ziel.

Ein wichtiger Faktor ist die Gärtemperatur. Sommer /74/ zeigte eine Verschlechterung des Schaums mit steigender Gärtemperatur bei obergärigen Verfahren. Krauß und Sommer wiederholten die Untersuchungen /75/ für untergärige Biere und fanden gleichen Ergebnisse. Bei offener Gärung war die Abnahme besonders deutlich. Grund für die Abnahme der Schaumwerte ist die starke Deckenbildung bei warmer Gärung.

Schwabe und Braun führten Untersuchungen durch, deren Ergebnisse jene von Krauß und Sommer unterstrichen. Als Ursache für die Abnahme des Schaums führten sie eine erhöhte Ausscheidung von Bitterstoffen an.

Durch Druckgärung kann eine höhere Gärtemperatur angewendet werden, ohne dass sich Einbußen beim Schaum ergeben. Unkel findet, dass sich bei der Druckgärung vermehrt kurzkettige, freie Fettsäuren bilden /70/.

Im Gegensatz dazu nimmt die Hefe während der Gärung einige Fettbestandteile auf, die weder beim Läutern noch der Trubentfernung abgeschieden wurden /76/.

Jede Schaumbildung im Verlauf der Bierherstellung, auch die Bildung einer Gärdecke, ist schädlich für den Schaum des fertigen Bieres. Die Verhinderung der Deckenbildung, wie sie von Thompson et al. /77/ durchgeführt wurde, reduziert die Wahrscheinlichkeit, dass schaumpositive Bierinhaltsstoffe verloren gehen. Sie führten eine Schüttelgärung durch. Gleiche Ergebnisse wurden durch Verfahren erreicht, bei denen die Gärdecke durch Umpumpen niedergehalten wurde.

Wackerbauer et al. /78/ zeigen, dass auch die Propagationsbedingungen der Hefereinzucht sich in der ersten Führung auf die Schaumqualität auswirken.

Unterschiede hinsichtlich Propagationstemperatur, Dauer der Herführung und Unterschiede in der Belüftung wurden untersucht.

Jedoch zeigt die Hefe insbesondere bei Lagerung über einen längeren Zeitraum, abhängig von der Art der Konservierung, ebenfalls einen Einfluß auf den Schaum des Bieres. Ein eindeutiger Trend, dass z. B. mit der Länge der Lagerung der Schaum abnimmt, läßt sich nicht festlegen. Vielmehr wird durch die Heferasse in Kombination mit einem bestimmten Konservierungsverfahren eine mehr oder minder gute Schaumhaltbarkeit erreicht /79/.

Primär hat die Heferasse einen Einfluß auf die Schaumstabilität, welcher durch die Art des Konservierungsverfahren mehr oder minder stark ausfallen kann.

### **3.5.6. Nachgärung/Reifung**

Kalte Lagerungstemperaturen von  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ergeben bessere Schaumhaltbarkeiten als Temperaturen von  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zürcher zeigte, dass die kalte Lagerung zur Ausscheidung schaumschädigender Fettsubstanzen erforderlich ist. Eine entsprechende Lagerzeit ist einzuhalten, ein Optimum wird nach ca. vier Wochen Lagerzeit erreicht. Diese Ergebnisse werden durch Narziß /80/ voll bestätigt.

Durch eine zu lange Lagerzeit können erhebliche Schaumschädigungen auftreten. Ursache sind die Autolyseerscheinungen der Hefe. Diese zeigen sich, wenn sämtliche Nährstoffe aus dem Jungbier verbraucht sind und die Reservestoffe von der Hefezelle aufgezehrt worden sind. Die Hefezelle stirbt ab, durch das Platzen der Zellmembran wird Zellinhalt in das Substrat abgegeben. Die Enzymausstattung der Hefe beinhaltet Proteinasen, welche dann im fertigen Bier in erheblichen Mengen vorliegen können. Trotz des Zelltods bleiben die Enzyme aktiv und können so Polypeptide abbauen /81/. Reicheneder zeigt die Abnahme des Gehalts an  $\text{MgSO}_4$ -fällbarem Stickstoff, verbunden mit der Zunahme an FAN. Gegenmaßnahmen im Bereich des Lagerkellers können in Form eines möglichst blanken Schlauchens (möglichst geringe Hefemenge im Lagertank) und einer sehr kalten Lagerung getroffen werden.

Der enzymatische Abbau schaumpositiver Polypeptide kann sich bis ins fertige Bier fortsetzen.

Die Gefäßgeometrie ist im Falle der Autolyse von Hefe auch von großer Bedeutung, da sich in einem ZKL abgesetzte Geläger zu jedem Zeitpunkt entfernen lassen. Die Gefahr der Autolyse ist geringer.

### **3.5.7. Filtration**

Bei der Filtration kann, mit einer Ausnahme, auf die Schaumstabilität im Bereich des Reinheitsgebotes lediglich so eingewirkt werden, dass hier keine Verschlechterung mehr eintritt. Eine Verbesserung ist durch Zusätze zu erreichen, welche nur außerhalb des Geltungsbereiches des Reinheitsgebotes eingesetzt werden dürfen. Eine Sterilfiltration des Bieres mittels Schichtenfilter führt bei Beginn des Filtrationszyklusses zu deutlichen Einbußen der Schaumqualität. Die Filterschichten üben eine adsorptive Wirkung auf hochmolekulares Eiweiß aus. Erst wenn die Schichten mit Proteinen „gesättigt“ sind, werden keine weiteren Moleküle gebunden, das Bier erreicht die vor der Filtration gefundenen Schaumwerte. Nach Runkel ist dies nach ca. 20 min der Fall. Bis dahin muss das Filtrat in einem Vor- und Nachlauftank aufgefangen werden und danach dem Bierstrom über die gesamte Filtrationszeit wieder zudosiert werden.

Die Adsorption von Proteinen an die Filterschichten wird darin deutlich, dass nach Abschluss der Filtration beim Spülen mit Kaltwasser für längere Zeit Schaum auf dem Abwasser zu beobachten ist. Erst nach völliger Entfernung des Schaums vom Wasser kann eine Spülung mit Heißwasser erfolgen, da die Eiweiße nicht im – an die Filterschicht – adsorbierten Zustand denaturieren dürfen, dies führt zu einer Schädigung der Filterschicht.

Die Stabilisierung ist ein weiterer Vorgang, der während der Filtration durchgeführt wird. Früher eingesetztes Bentonit schädigt den Schaum bereits bei Einsatz geringer Mengen /82/. Heute werden Kieselgelpräparate zur eiweißseitigen Stabilisierung eingesetzt. Der Zusatz beträgt im Normalfall ca. 30 bis 50 g pro hl. Silbereisen und Kersting zeigen, dass diese geringe Zugabe keine nachhaltige Schaumschädigung mit sich bringt. Ab einer Überdosierung von 500 g pro hl wird der Schaum beeinträchtigt. Kieselgele wirken auf N-Fractionen mit einem Molekulargewicht von mehr als 60 kDa, welche für die Schaumstabilisierung von untergeordneter Bedeutung ist.

Im Gegensatz dazu wirken Bentonite nicht so selektiv wie Kieselgele. Sie binden Eiweißverbindungen mit einem Molekulargewicht von mehr als 5 kDa /70/.

Zur Verhinderung der Bildung von Eiweiß-Gerbstoff-Verbindungen, welche eine unzureichende nicht-biologische Stabilität durch Trübung anzeigen, werden Stabilisierungsmittel eingesetzt, die als künstliche Eiweiße Gerbstoffe entfernen. Von diesen Stoffen (PVPP) geht nur eine geringe Gefährdung des Schaums aus. Weyh sieht in der Verwendung von PVPP eine eher schaumpositive

Verfahrensweise, bei seinen Versuchen ist eine Steigerung des  $\Sigma$ -Wertes von 5 Einheiten zu beobachten /83/.

Die Filtration über Aktivkohle kann zu einer deutlichen Schaumsteigerung führen, dies aufgrund der Entfernung von schaumnegativen Anteilen. Die Aktivkohle bindet gesättigte und ungesättigte Fettsäuren, deren schaumzerstörendes Potential nicht mehr zum Tragen kommt /64/.

Außerhalb des Gültigkeitsbereiches des Reinheitsgebotes können Enzympräparate zur Stabilisierung eingesetzt werden. Bei diesen Enzymen handelt es sich um Proteasen, welche die hochmolekularen Eiweißverbindungen abbauen und den Polyphenolen den Reaktionspartner bei der Trübungsbildung entziehen. Der Zusatz erfolgt in ganz geringen Mengen von 0,1 bis 2 g pro hl. In diesem Bereich ist eine geringfügige Abnahme des Bierschaums zu beobachten. Eine höhere Dosierung führt zu massiven Einbußen /82/. Diese Enzyme (z.B. Papain, Pepsin, Bromilin, Fizin) sind beim Abbau von Eiweißstrukturen so aktiv, dass enzymstabilisierte Biere pasteurisiert werden müssen, da die Enzymwirkung anderenfalls fortschreitet und beim Verzehr keine Schaumhaltbarkeit mehr zu beobachten ist.

Die beiden gewünschten Faktoren Schaumstabilität und chemisch-kolloidale Stabilität sind Punkte, die sich bis zu einem gewissen Maß gegenseitig beeinflussen. Während ein hoher Gehalt hochmolekularer Proteine für den Schaum als positiv zu betrachten sind, ist bei der Stabilität das Umgekehrte der Fall. Es muss somit ein technologischer Mittelweg gefunden werden /84/.

#### **3.5.8. Abfüllung**

Ist der Drucktank im Technologieablauf erreicht, sind die Einflussmöglichkeiten ausgeschöpft. Im Zuge der Abfüllung können jedoch Fehler gemacht werden, die zu einer Schädigung führen können.

Insbesondere ist hier der Vorgang der Flaschenreinigung zu nennen. Die Flaschen und Kegs dürfen keine Reinigungsmittelreste aufweisen, da diese zur Herabsetzung der Oberflächenspannung meist mit Tensiden versetzt sind. Dies wirkt sich nachteilig auf den Schaum aus; deutliche Verminderungen sind zu beobachten.

Im Bereich innovativer Verpackungen hat die „Widget-Dose“ Einzug gehalten. Diese gewährleistet das Schäumen des Bieres auch in der normalerweise „schaumfreien“ Dose /85/.

Die Alterung des Bieres trägt auch zu einer Verschlechterung der Schaumstabilität bei. Verantwortlich sind proteolytische Enzyme aus der Hefe. Im Hinblick auf konstante Schaumwerte über eine lange Lagerzeit ist die Pasteurisation ein Weg,

dies zu realisieren. Die Inaktivierung der Enzyme wird durch die Denaturierung mittels Wärmeeinwirkung erreicht. Pasteurisierte Biere zeigen im Vergleich zu nicht pasteurisierten Vergleichsbieren hinsichtlich der Schaumstabilität nach längerer Lagerzeit bessere Ergebnisse /86/. Je länger die Lagerung dauert, umso größer werden die Unterschiede. Nielsen et al. erreichen gleiche Ergebnisse /87/. Dies lässt sicher allerdings nur bei Anwendung eines der beiden eingeführten Schaummessverfahren, NIBEM oder Ross & Clark, zahlenmäßig beweisen.

Weyh und Hagen sind im Gegensatz dazu der Ansicht, dass bei Anwendung einer „praxisnäheren“ Einschenkmethod die Schaumabnahme bei einer Lagerung von sechs bis acht Monaten kaum auftritt, einzelne Proben waren ein Jahr lang stabil.

Eine Verschlechterung des Bierschaumqualität konnte auch bei hefefhaltigen Weizenbieren nicht bewiesen werden /88/.

### **3.5.9. Zusatz bierschaumstabilisierender Substanzen**

Der Zusatz von Schaumstabilisatoren ist im Geltungsbereich des Reinheitsgebotes generell verboten. In anderen Ländern sind jedoch eine Reihe von Schaumstabilisierungsmitteln im Einsatz.

Einen positiven Einfluss auf den Schaum hat der Zusatz hochmolekularer, phosphorilierter Polysaccharide. Ein US-Patent aus dem Jahre 1959 beschreibt die Verfahrensweise des Zusatzes von Mannan, welches extrazellulär von der Hefe „Hansenula holstii“ gebildet wird. Nach der Extraktion dieses Stoffes von der Zellwand liegt ein weißes Pulver vor, welches dem fertigen Bier oder in jedem anderen Produktionsschritt zugesetzt werden kann. Eine Verbesserung von 10 % kann erreicht werden, je nach gewünschter Stabilisierung ist eine Zugabe von 20 bis 80 ppm möglich /89/.

### **3.6. Bekannte Verfahren der Bierschaummessung und umweltbedingte Einflussfaktoren auf diese Messmethoden**

Die Geschichte der Schaummessung zeigt die vielfältigen Ansätze zur Bestimmung der Bierschaumstabilität. Innerhalb der Diskussion konnten die Verfahren, die eine Aussage ohne einen Zahlenwert machten, sich nicht durchsetzen. Lediglich ein Zahlenwert stellt eine statistisch überprüfbare Größe dar, ist also für eine sinnvolle Auswertung zwingend erforderlich.

Es ist für eine Methodenentwicklung von Vorteil, wenn sich in gewissen Bereichen lineare Verhältnisse postulieren lassen.

Wie bereits erwähnt haben sich lediglich die Methoden nach Ross & Clark und Klopfer (NIBEM-Methode) durchgesetzt. Die Vor- und Nachteile werden nachfolgend geschildert.

### **3.6.1. Grundsätzliche Einflussfaktoren auf die Bierschaummessung**

Der Bierschaum stellt innerhalb der Schäume ein Unikat dar. Kurzzeitig nach der Schaumbildung kann dieser als Polyederschaum vorliegen. Hauptsächlich tritt der Bierschaum als polydisperser Kugelschaum auf.

Der Zerfall wird durch die eingehenden Stoffkennwerte Dichte und dynamische Viskosität bei der Drainage beeinflusst. Für die Disproportionierung (Ostwald-Reifung) sind dies der Diffusionskoeffizient der Gasphase, die Oberflächenspannung und der atmosphärische Druck.

Grundsätzlich liegt beim Bierschaum eine hohe Zerfallskinetik vor, welche beim Lg-Foamtester durch First Drain (Drainagezeit) und Half Life-Time (Halbwertszeit des Schaums) beschrieben wird.

Neben den kausalen Bierinhaltsstoffen üben Milieubedingungen wie Temperatur, atmosphärischer Druck und relative Luftfeuchtigkeit einen entscheidenden Einfluss auf die Bierschaumstabilität aus. Eingeschränkt kommen noch die Faktoren Partikelbelastung und Luftbewegung hinzu.

Eine automatisierte Analysentechnik mit hoher Reproduzierbarkeit zur Qualitätsbewertung von Bier ist nicht bekannt.

Im Rahmen der geschichtlichen Betrachtung wie auch in der Diskussion um die Ergebnisse der beiden Standardmessverfahren werden die Gründe für die Abweichungen kaum weiter untersucht. Neben den systematischen Einflüssen sind auch Umgebungseinflüsse ein Grund für die Streuung von Messergebnissen.

Prinzipiell sind die möglichen Einflussfaktoren auf den Bierschaum während der Messung begrenzt. Insbesondere die entstehenden subjektiven Einflüsse sind nicht zu quantifizieren.

Untersuchungen zum Temperatur- und Druckeinfluss sind 1999 durch Hoffmann durchgeführt worden /90/. Zu Untersuchung wurde der NIBEM-Apparat verwendet. Bei der Erhöhung der Raumtemperatur um 10 °C verringert sich der Messwert eines Bieres von 288 auf 240 s. Gleiches gilt im Wesentlichen für die Biertemperatur.

Bereits 1933 erwähnte Helm /28/ den Einfluss von Proben- und Raumtemperatur. Er kommt zu dem Schluss, dass ein zu kaltes Bier schlecht aufschäumt und ein zu warmes Bier eine schlechte Schaumhaltbarkeit zeigt.

Mit steigender Luftfeuchtigkeit steigt auch die Schaumhaltbarkeit an, da der Dampfdruck in der Luft einem Verdunsten von Flüssigkeit aus dem Schaum entgegenwirkt und so eine längere Verweilzeit im Schaum zustande kommt. Hoffmann beobachtet genau den umgekehrten Vorgang, mit steigender Luftfeuchtigkeit zerfällt der Schaum immer schneller. Er begründet dies dadurch, dass an der Grenzfläche zwischen Schaum und Atmosphäre durch die Verdunstungskälte eine Abkühlung bis unterhalb der Kühlgrenztemperatur erfolgt und es zur Kondensation von Wasserdampf kommt, welcher den Schaum zerstört.

Die Abhängigkeit der Schaummessung vom Luftdruck wurde durch die Messung eines Bieres an zwei verschiedenen Standorten mit unterschiedlicher Höhe über NN (360 m bzw. 565 m) belegt. Trotz gleicher Bier- und Raumtemperatur und fast gleicher relativer Feuchte wurden Differenzen von 25 s (NIBEM) ermittelt.

Der Einfluss des Umgebungsdrucks wird auch bei einer Betrachtung der Torricelli-Skala deutlich. Bei einem Normalwert von 750 Torr (= 750 mm Hg-Säule) kann davon ausgegangen werden, dass bei einem Höhenunterschied von 11 m bereits ein um 1 Torr geringerer Absolutdruck (als Richtwert) gemessen wird.

Ansems und van Akkeren /91/ verdeutlichen neben den erwähnten Einflussfaktoren die Luftbewegung als externe Störgröße. Die Simulation erfolgte durch einen auf die Messapparatur gerichteten Ventilator. Bereits eine geringe Luftbewegung ( $< 0,3$  m/s) führt zu einer Veränderung des Messwertes. Starke Luftbewegung (1 m/s) führt zu einem beträchtlich niedrigerem Durchschnittswert mehrerer Messungen. Die Ursache der schnelleren Schaumabnahme sehen die beiden Autoren nicht in der Erschütterung des Schaumsystems, sondern darin, dass das  $\text{CO}_2$ -Polster oberhalb des Schaums durch die Luftbewegung entfernt wird und die Diffusion von  $\text{CO}_2$  aus dem Schaum schneller verlaufen kann. Eine auftretende Konvektion sorgt für eine weitere Entfernung des  $\text{CO}_2$ -Polsters.

Zur Korrektur der Messfehler, welche durch die Umgebungseinflüsse entstehen, werden zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen:

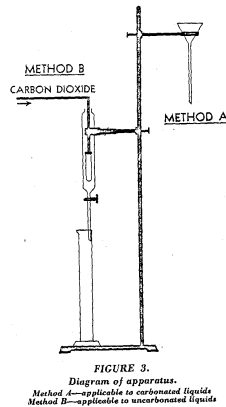
1. Eine weitgehende Konstanz der Umgebungseinflüsse, was nur hinsichtlich der Proben temperatur sowie der Luftbewegung möglich ist. Die Regelung anderer Parameter erfordert nach Annahme der Autoren ein hohes Investitionsvolumen.
2. Messung der Umgebungsbedingungen, Festlegung der Abweichungen im Hinblick auf eine Referenzsituation und Kompensation oder Korrektur durch einen Korrelationskoeffizienten.

Ansems und van Akkeren definieren für bestimmte Umgebungseinflüsse Zahlenwerte, welche in Korrekturtabellen zusammengefasst werden. Es zeigen sich

neben nicht beeinflussbaren Umweltbedingungen auch Faktoren, welche durch eine unsachgemäße Bedienung der Geräteperipherie entstehen können. Dies soll am Beispiel des NIBEM-Apparates verdeutlicht werden: die richtige Einstellung des CO<sub>2</sub>-Drucks hat einen maßgeblichen Einfluss auf die gemessene Schaumhaltbarkeit. Nach Anweisung ist die Küvette in drei bis vier Sekunden zu füllen, wird diese Zeit überschritten, kommt es zu einer massiven Abnahme der Schaumstabilität. Begründet wird dies durch die herabgesetzte Fließgeschwindigkeit beim Durchfluss durch den Foam-Flasher, in diesem Fall entstehen größere Blasen. Es wird deutlich, dass auch eine automatisierte Handhabung Bedienungsfehler, mit Folgen für das Messergebnis, mit sich bringen kann. Mögliche Bedienungsfehler bei diesem Vorgang vor der Messung stellen bereits eine Eingangsstörgröße dar. Tatsächlich können die Faktoren, wenn an der bisherigen Analytik festgehalten wird, nur durch größere Investitionen ausgeschaltet bzw. standardisiert werden. Es wäre erforderlich, die Schaummessplätze in einem temperierten, konditionierten Raum unterzubringen, in dem nur geringste Luftbewegungen zugelassen werden.

### **3.6.2. Ross & Clark**

Die Methodenentwicklung von Ross & Clark beinhaltet einen mathematisch ausgeprägten Ansatz. Die beiden Mathematiker unterschieden zwischen einem dynamischen Schaum (Gleichgewicht von Schaumbildung und Zerfall (nach Bikerman /20/) und einem statischen Schaum, bei dem nach Erzeugung der Zerfall gemessen wird. Aus der Halbwertszeit des Schaums lässt sich nach Annahme von Ross & Clark die mittlere Lebensdauer einer Schaumblase errechnen. Es ergibt sich eine Kennzahl, der  $\Sigma$ -Wert. Dies sei eine physikalische Konstante des Bieres, welche allerdings nicht in der gesamten Lebensdauer des Schaums gelte, sondern vom Beginn der zweiten Minute des Zerfalls bis zum Ende der fünften /31/. Bei der Methodenentwicklung griffen Ross & Clark einen Ansatz von Bikerman auf, der die Schaumfähigkeit einer Flüssigkeit als eine spezifische physikalische Eigenschaft beschreibt /20/.



**Abb. 3.18.: Messmethode nach Ross & Clark für karbonisierte und nicht-karbonisierte Flüssigkeiten /31/**

Am Beginn ihrer Arbeit stand die Untersuchung des Aufschäumens der Flüssigkeit. Das Ergebnis dieser Untersuchungen war die proportionale Abhängigkeit des gebildeten Schaumvolumen von der Stärke durchgeleiteten Gasstroms.

Es ergibt sich folgender mathematischer Zusammenhang:

$$\frac{V_m \cdot t_s}{V} = f \quad \text{(Gleichung 3.16.)}$$

Es zeigte sich, dass der konstante Wert  $f$  bei Verwendung großer Flüssigkeitsvolumina unabhängig von der Einrichtung oder der Luftströmungsrate war.

Das Symbol  $\Sigma$  wird als mathematischer Ausdruck für die Schaumfähigkeit von Bickman übernommen. Seine Ergebnisse lassen sich zwar nicht ohne Weiteres auf den Bierschaum übertragen, da die Schaumhaltbarkeit von Bier das kontinuierliche Einblasen von Gas in die Flüssigkeit unmöglich macht. Wird allerdings angenommen, dass der  $\Sigma$ -Wert die bereits angegebene mittlere Lebensdauer einer Schaumblase darstellt, gelten für einen statischen Schaum die gleichen Gesetzmäßigkeiten, wie sie auch in anderen (unendlichen) Zerfallsvorgängen zu finden sind:

$$W(t) = W_0 e^{-kt} \quad \text{(Gleichung 3.17.)}$$

Die Entwicklung der Formel erfolgt aufgrund der von Helm /28/ vorgeschlagenen Carlsberg-Methode in Kombination der Blom-Methode /29/.

Blom drückt seine gewonnenen Ergebnisse in folgender Formel aus:

$$k = \frac{1}{t} \log \frac{W_0}{W} \quad \text{(Gleichung 3.18.)}$$

Helm schlägt vor, den Ausdruck  $\frac{1}{k}$  als Resultat anzunehmen, Blom bevorzugt den Ausdruck  $h$ , als Halbwertszeit des Schaums.

Beide Ergebnisangaben können in  $\Sigma$ -Werte konvertiert werden:

$$\Sigma = 26,05 \frac{1}{k} \quad \text{(Gleichung 3.19.)}$$

bzw.

$$\Sigma = \frac{h}{2,303 \log 2} \quad \text{(Gleichung 3.20.)}$$

Die gravimetrische Carlsberg-Methode nach Blom, bei deren Anwendung eine bestimmte Biermenge aufgeschäumt wird und dann zerfällt, gewinnt als Ergebnis eine „Gesamt-Schaumfähigkeit“ ( $Pt$ ) des Bieres ausgedrückt in der Formel:

$$Pt = \frac{(b+c) 100}{a+b+c} [\%] \quad \text{(Gleichung 3.21.)}$$

Ein weiterer gewonnener Wert ist der verbleibende Schaum ( $Pr$ ) nach Ende der Rückbildungszeit (8 Minuten):

$$Pr = \frac{c \cdot 100}{a+b+c} [\%] \quad \text{(Gleichung 3.22.)}$$

Werden die genannten Formeln der Lösungsansätze gleichgesetzt ergibt sich:

$$\frac{W_o}{W} = \frac{b+c}{c} = \frac{Pt}{Pr} \quad \text{(Gleichung 3.23.)}$$

Der Reziprokwert ergibt:

$$\frac{c}{b+c} = \frac{Pr}{Pt} = e^{kt} \quad \text{(Gleichung 3.24.)}$$

Schließlich ergibt sich:

$$\Sigma = \frac{t}{2,303 \log \frac{Pt}{Pr}} = \frac{t}{2,303 \log \frac{b+c}{c}} \quad \text{(Gleichung 3.25.)}$$

Kolbach und Schilfarth kommen zu den gleichen Ergebnissen wie Lienert. Der  $\Sigma$ -Wert ist keine von der Methodik unabhängige Konstante /20/. In der Veröffentlichung werden Gerätschaften und Arbeitsabläufe standardisiert. Es wird gezeigt, dass die Schaumstabilität eines Bieres unabhängig vom  $\text{CO}_2$ -Gehalt ist. Die Arbeitsabläufe und Gerätschaften, welche von Kolbach und Schilfarth /20/ angegeben wurden, sind bis heute in der Schaumanalytik gebräuchlich. Die gute

Reproduzierbarkeit der Ergebnisse beruht auf dieser Standardisierung. In dieser Form ist die Schaummessung nach Ross und Clark in den brauereispezifischen Analysensammlungen enthalten.

Die Formel zur Berechnung des  $\Sigma$ -Wertes wurde nach den Modifikation ebenfalls geringfügig verändert.

$$\Sigma = \frac{150}{2,303 \cdot \log \frac{b_{K\&S} + c_{K\&S}}{c_{K\&S}}} \quad (\text{Gleichung 3.26.})$$

Der Faktor t (Gleichung 3.25.) wurde aufgrund des standardisierten Zerfalls von 150 s durch den konstanten Wert von 150 ersetzt.



**Abb. 3.19.: Schaummessplatz nach Ross & Clark**

Die Methodenentwicklung nach Ross & Clark mit den Modifikationen nach Kolbach und Schilfarth kann als Zusammenfassung verschiedener Ansätze angesehen werden. Die mathematische Verknüpfung der verschiedenen Ergebnisangaben stellen einen Schwerpunkt der Arbeit dar.

Kolbach & Schilfarth führten verschiedene Untersuchungen von Faktoren durch, deren Einfluss festgestellt werden sollte. Hierbei ging es um methodische Fehler, sowie Faktoren, die sich durch die Standardisierung ergaben und deren Einfluss auf die Analysenvorschrift quantifiziert werden sollten.

Die Ergebnisse sind im folgenden kurz zusammengefasst:

### 1. CO<sub>2</sub>-Gehalt

Mit einem höheren CO<sub>2</sub>-Gehalt des Bieres werden höhere  $\Sigma$ -Werte erreicht. Die Entkarbonisierung wurde durch einfache Diffusion des Bieres in die Umgebungsluft erreicht. Hierzu wurden die Biere bis zu 16 Stunden stehen gelassen. Der  $\Sigma$ -Wert verbessert sich mit Länge der Standzeit, wobei erst ab 6,5 h keine deutliche Verbesserung erreicht wird. Die Ursache der verbesserten Schaumstabilität liegt in der Verdampfung von Wasser und Ethanol aus der Flüssigkeit, was zu einer Konzentrationssteigerung schaumpositiver Substanzen führt.

Kolbach & Schilfarth kommen zu der Erkenntnis, dass der CO<sub>2</sub>-Gehalt sich nicht auf den  $\Sigma$ -Wert auswirkt.

### 2. Einfluss der Messapparatur

Insbesondere der Durchmesser des Schaumzylinders und die Beschaffenheit des Gasverteilungsrohres (Fritte) wirken sich auf das Ergebnis aus.

Je geringer der Durchmesser des Zylinders, desto höher ist die gemessene Schaumstabilität. Die Höhe der erzeugten Schaumsäule ist in einen Zusammenhang mit dem Messwert der Schaumstabilität zu bringen.

Die Verwendung unterschiedlicher Fritten wirkt sich ebenfalls auf den  $\Sigma$ -Wert aus. Es werden jedoch keine Angaben zu den Unterschieden gemacht.

### 3. Temperatur des Messmediums

Eine Temperaturabhängigkeit der Messwerte wird auch durch Kolbach & Schilfarth bewiesen. Der untersuchte Temperaturbereich lag zwischen 10 und 25 °C. Mit steigender Temperatur wird ein um 13 Punkte kleinerer  $\Sigma$ -Wert gemessen. Als Ursache sehen die Autoren eine Erhöhung der Diffusionsgeschwindigkeit des Kohlendioxids.

### 4. Flüssigkeitsmenge

Wird ein gleiches Schaumvolumen aus 2 verschieden großen Flüssigkeitsvolumina hergestellt, ergibt sich eine Schaumverschlechterung in Richtung des größeren Flüssigkeitsvolumen.

Als möglicher Grund für dieses Verhalten wird eine bessere Ausprägung der Interaktionen hochmolekularer schaumpositiver Moleküle angenommen (Abb. 3.4.). Bei der größeren Flüssigkeitsmenge verbleiben die Blasen während des Aufschäumens länger in der Flüssigkeit, was dem Zustandekommen der Wechselwirkungskräfte eine längere Zeitspanne einräumt.

#### 5. Schaumbildungszeit

Durch Variation des CO<sub>2</sub>-Drucks wurde die Aufschäumzeit auf 30 bzw. 60 s festgelegt. Je länger das Aufschäumen dauert, desto besser wird die Schaumstabilität. Durch den niedrigeren Druck bilden sich kleinere Blasen, welche zu einer gesteigerten Schaumhaltbarkeit führen.

Eine Verkürzung unter eine Zeit von 30 s führte zur Bildung von „Gasschläuchen“ während des Aufschäumens und damit zu einer weiteren Verminderung der  $\Sigma$ -Werte.

#### 6. Wartezeit

Nach der Schaumbildung soll durch eine Wartezeit eine „Egalisierung“ des Schaums herbeigeführt werden. Eine verlängerte Wartezeit bis zum Beginn der Messung führt durch Verfestigung der Schaumkolloide zu höheren  $\Sigma$ -Werten.

#### 7. Schaumzerfallszeit

Blom sieht eine gleichbleibende Schaumzerfallsfunktion in einem Bereich von bis zu 4 min nach den Aufschäumen. Wird der Betrachtungszeitraum innerhalb dieser Zeitspanne immer weiter nach hinten verlegt, verbessert sich der  $\Sigma$ -Wert deutlich. Kolbach & Schilfarth ermitteln einen nahezu konstanten Wert zwischen 150 und 210 s.

Aus diesem Ergebnis folgt die Festlegung einer Schaumzerfallszeit für die vorgeschlagene Methode von 150 s.

#### 8. Art der Schaumerzeugung

Die Schauminduktion wurde nach zwei Verfahren durchgeführt:

- a. nach De Clerck (durch freien Fall in einen Schaumzylinder)
- b. nach eigener Methode (durch Einleiten von Gas)

Es zeigt sich, dass die Schaumstabilität bei der zweiten Methode geringer ist.

Diese wird jedoch aufgrund der besseren Reproduzierbarkeit gewählt.

Die Problematik der Milieubedingungen trifft für die Analyse nach Ross und Clark ebenfalls zu. Eine Temperierung der Proben auf einen Wert von 20 °C schaltet zwar einen der wesentlichen Faktoren aus, doch die Einflüsse des Umgebungsdrucks und Luftfeuchtigkeit sowie der Temperatur der verwendeten Geräte, resultierend aus der Raumtemperatur, stellen Fehlerquellen der Methodik dar /103/.

#### **3.6.3. NIBEM-Methode nach Kloppe**

Kloppe /92/ übt massive Kritik an der Methode von Ross und Clark, da die Theorie auf die sich die Analyse stützt, sehr mangelhaft sei. Die gewonnenen Resultate seien ohne praktische Bedeutung. Im Gegensatz zur Benutzung einer konstanten

Biermenge, meint Klopfer, dass eine konstante Schaummenge zu besseren Resultaten führe. Durch Einleiten von  $\text{CO}_2$  wird Schaum gebildet. Nachdem sich 95 % zurückgebildet haben, wird der Zeitraum als Schaumdauer ausgedrückt.

Lienert entgegnet, dass die Geschwindigkeitskonstante des Schaumzerfalls nicht linear sei, sondern abnehme. Das heißt, dass der Schaum mit der Zeit stabiler wird. Er stellt jedoch zur Diskussion, dass die Festlegung des zu beobachtenden Zeitraums von Bedeutung sei. Wenn der Beobachtungszeitraum korrekt gewählt würde, wären „richtige“ Werte die Folge /93/.

Klopfer /92/ kommt zu der Annahme, dass sich bei den Methoden nach Ross & Clark und Blom /94/, in denen die zurückgebildete Flüssigkeit gemessen wird, nicht die wahren Verhältnisse widerspiegeln. Eine gute Reproduzierbarkeit sei zwar gegeben, aber die tatsächlichen Eindrücke vom Schaum würden nicht dargestellt.

Die Messung der zurückgebildeten Flüssigkeitsmenge ist die Zusammenfassung mehrerer beschriebener Vorgänge. Die Flüssigkeitsrückbildung dieser Vorgänge sei in ihrem Verhältnis zueinander ungeklärt und variere von Fall zu Fall.

Eine Untersuchung des Schaums an sich sei der bessere Weg. Klopfer bevorzugt daher die Methode von De Clerck und De Dycker /37/, jedoch sei diese Methode deutlich zu arbeitsintensiv, eine Untersuchung vieler Proben nur schwer möglich.

Der ursprüngliche Ansatz des Messsystems von Klopfer wurde an eine Einrichtung zur Messung der Pegelstände im Rhein-Delta angelehnt. Die Küvette zur Messung wird der De Clerck / De Dycker-Methode entnommen. Das Standardglas hat folgende Abmessungen:

Innerer Durchmesser: 60 mm

Innere Höhe: 120 mm

Stärke der Glaswand: 2 mm

Die Induktion des Schaums kann nach 3 verschiedenen Techniken erfolgen:

- Einschenkmethode
- $\text{CO}_2$ -Einleitung durch eine Sinterkerze
- Ultraschalleinwirkung

Es zeigt sich, dass die beiden zuletzt genannten Methoden die geringste Standardabweichung zeigen. Trotzdem wurde eine Einschenkmethode bei der Entwicklung bevorzugt. Unabhängig von der Art der Schauminduktion wurde darauf geachtet, dass eine Schaumsäule von 50 mm Höhe erzeugt wurde.

Zur Analyse selbst werden keine Angaben zur statistischen Sicherheit gemacht. Hinsichtlich dessen ist die Methode lediglich als Vorschlag zu bezeichnen. Aufgrund

der weitgehenden Automatisierung und Bedienerunabhängigkeit hat sich dieses System in der Routineanalytik durchgesetzt.

Eine Neuerung im Bereich der Schaumanalytik wurde durch Klopfer 1973 in Salzburg vorgestellt /92/. Den Methoden von Ross & Clark sowie Blom und Rudin wird der Praxisbezug abgesprochen. Trotz guter Reproduzierbarkeit scheitern die Methoden daran, dass keine Aussage über die Schaumqualität gemacht wird. Die Erzeugung und Messung einer konstanten Schaummenge sei deshalb der einzige Weg zu einem repräsentativen Ergebnis zu kommen.

Der Schaum wird durch eine Blende erzeugt, zur Füllung der definierten Küvette wird eine bestimmte Zeit vorgesehen, entsprechend ist der Vordruck des Treibgases einzustellen.

Nachdem die Küvette gefüllt ist, wird sie in das Messgerät eingebracht. Die Messung wird gestartet, ein Servomotor führt eine Einrichtung an die Schaumoberfläche. An dieser befinden sich 5 Elektroden (1 Anode, 4 Kathoden). Zwischen den Elektroden beginnt bei Kontakt mit dem Schaum ein Strom bestimmter Stärke zu fließen. Durch die Abnahme der Schaumhöhe werden nach und nach einzelne Elektroden frei, der Stromfluss wird geringer. Sind drei Kathoden nicht mehr in die Schaumoberfläche eingetaucht, führt der Servomotor den Messkopf nach, bis der gewünschte Stromfluss durch erneutes Eintauchen der Elektroden wieder erreicht ist. Diese Vorgehensweise wiederholt sich bis die Schaumhöhe um 4 cm abgenommen hat. Die Angabe des Messergebnisses erfolgt in Sekunden.

Im Bereich des Messkopfes entsteht ein 1 bis 2 cm hoher Schaumpilz. Im Zuge der Messung, werden durch den Stromfluss verschiedene polare Substanzen, welche schaumstabilisierend wirken, hier akkumuliert. Eine Verzerrung des Ergebnisses erscheint so wahrscheinlich.

Dem Einfluss der Umgebungsbedingungen wird bei der Weiterentwicklung des NIBEM-Apparates Rechnung getragen. Eine eingehauste Bauweise des NIBEM-Apparates der neuesten Generation schließt die Luftbewegung als Störfaktor weitgehend aus. Die Probentemperatur soll durch den Einbau einer Temperaturkompensation in der Messsonde als Störgröße ausgeschaltet werden. Zur Temperaturkompensation muß ein Korrekturfaktor empirisch ermittelt und programmiert werden. Der zu ermittelnde Kompensationsfaktor ist sortenspezifisch. Dies stellt möglicherweise die bessere Vorgehensweise dar als ein genereller Korrekturfaktor.

#### **3.6.4. Carlsberg-System / Lg-Foamtester**

Um umwelt- und systembedingte Einflußfaktoren zu kompensieren hat das Carlsberg-Institut, Kopenhagen, eine automatische Schaummesseinrichtung entwickelt. In diesem Messgerät wird mittels eines induktiven Durchflussmessers eine konstante Biermenge dosiert. Die Messung findet in einer temperierten Kammer statt. Ferner ist eine automatische Probenahme eingebaut, das Messsystem arbeitet über eine große Probenanzahl selbständig. Im Hinblick auf eine Rationalisierung des Laborbetriebs ist eine solche Probenverarbeitung mit angeschlossener Speicherung der Analysendaten als sehr probat zu bezeichnen. Nachteil dieses Autosampling-Device ist jedoch, dass die Probe zunächst in einen standardisierten Metall-Probenbecher eingebracht werden muss.

Das Messgerät „System Carlsberg“ blieb wegen der hohen Kosten und des hohen Wartungsaufwandes ein Einzelstück.

Aufbauend auf dem vorgenannten Messgerät wurde von der Fa. Lg-automatic, Frederiksvaerk, DK, eine Messeinrichtung entwickelt, welche sich hinsichtlich der Messwertermittlung durch zwei Photozellen an das „System Carlsberg“ anlehnt.

Die Kostensituation zwang die Entwickler zu einer Reihe von Vereinfachungen. Auf eine Einhausung zur Temperierung wurde verzichtet. Die Probe wird durch eine Ansticheinrichtung in das Messgerät eingebracht. Die Analysenwerte sind nur manuell zu verarbeiten.

Die personalarme Messung des „Systems Carlsberg“ wird wieder zurückgeführt, jedoch ist die Kosten-Nutzen-Situation deutlich besser. Die Messung läuft immer noch automatisch ab, pro Messvorgang ist eine Rüstzeit von 2 Minuten einzukalkulieren. Der Lg-Foamtester stellt eine der letzten Entwicklungen im Bereich der Schaummessung dar. Durch eine eingebaute Temperaturkompensation besteht die Möglichkeit, eine nicht-temperierte Probe zu verarbeiten.

Die anderen aufgezeigten Einflüsse auf die Schaummessung sind jedoch auch nicht auszuschließen.

Die Reinigung des Gerätes erfolgt durch Leitungswasser, der Umgang mit Chemikalien wird auf eine turnusmäßige Grundreinigung beschränkt. In Mitteleuropa kann je nach Jahreszeit von einer Leitungswassertemperatur von 5 bis 20 °C ausgegangen werden. Die Spülung des Gerätes zwischen zwei Messungen führt somit zu einer Temperierung der Messeinrichtung.

Während bei der Ross & Clark-Methode der Schaum durch das Einleiten von Fremdgas erzeugt wird sind es beim NIBEM-Apparat und beim Lg-Foamtester Hochscherprozesse, die zu einer Schauminduktion durch Nukleation führen.

## **4. Materialien und Methoden**

### **4.1. Materialien**

Zur Untersuchung der Parameter Umgebungsdruck und Temperatur wurden neun verschiedene Biere herangezogen.

Die Biere wurde so ausgewählt, dass eine repräsentativer Querschnitt durch die in Deutschland produzierten Biere gewonnen wurde. Nicht jede Randsorte konnte berücksichtigt werden, die ausgewählten Biere waren:

- 2 Pilsener Biere
- 2 Alkoholfreie Biere (1 Kältekontaktverfahren, 1 Dialyseverfahren)
- 1 Schwarzbier
- 1 Bockbier
- 1 Schankbier
- 2 Weizenbiere (1 Hefeweizen, 1 Kristallweizen)

Einführende Untersuchungen wurden im Rahmen der Vergleichsanalyse der Messmethoden „Ross & Clark“ und „Lg-Foamtester“ der DLG-Kampagne 2001 durchgeführt. Innerhalb dieser Analysenreihe werden ca. 250 Biere, jeweils bestehend aus 2 Proben – im Abstand von vier Wochen entnommen – untersucht.

Neben der Messungen der Schaumstabilität werden weitere Parameter analysiert:

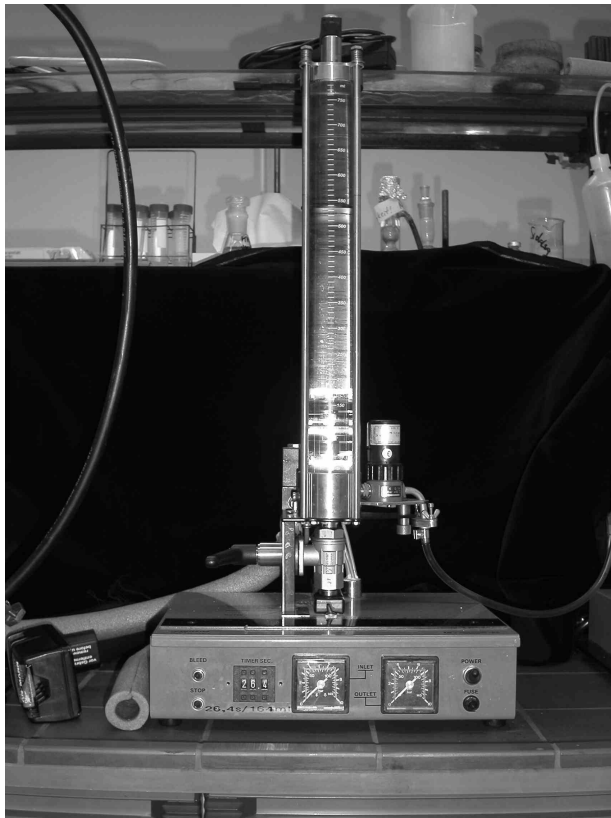
- Stammwürze- / Alkoholgehalt
- chemisch-technische sowie mikrobiologische Stabilität
- Verkostung
- pH-Wert
- Farbe

Bei Spezialbieren, wie z. B. Diätbieren, werden spezielle, den Anforderungen entsprechende Analysen durchgeführt.

Insgesamt wurden in der DLG-Kampagne 2001 258 Biere eingeschickt. Mehrheitlich wurde eine Untersuchung nach Ross & Clark und Lg-Foamtester durchgeführt.

## **4.2. Schaummessgeräte**

### **4.2.1. Lg-Foamtester**



**Abb. 4.1.: Gesamtansicht des Messgeräts**

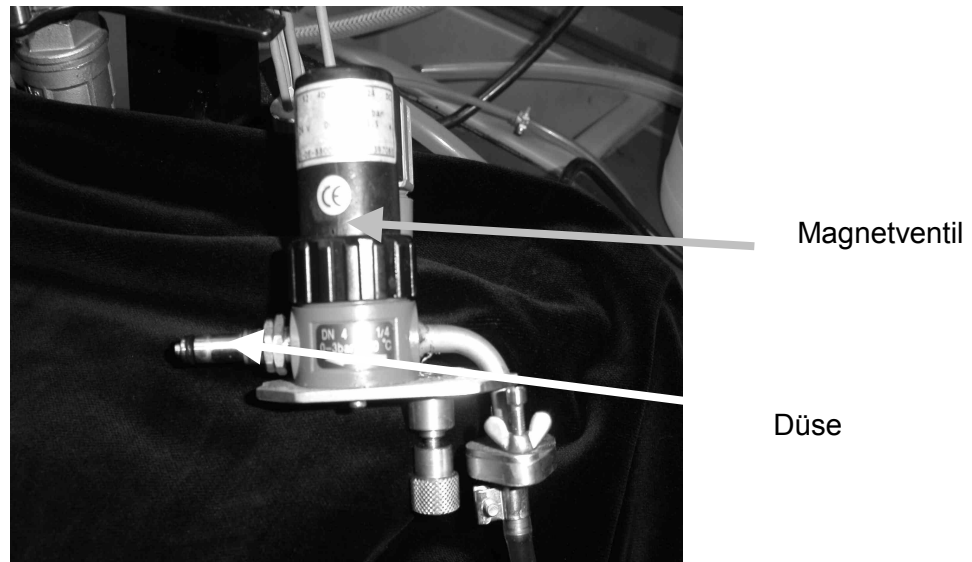


**Abb. 4.2.: Ansticheinrichtung**

Der Lg-Foamtester ist ein neuartiges Messgerät für Bierschaum. Es beruht auf dem Messprinzip des Aufschäumens eines konstanten Biervolumens und der Zeitmessung bis zur Rückbildung bestimmter Flüssigkeitsvolumina.

#### **4.2.1.1. Messprinzip**

Aufgeschäumt wird eine Biermenge von 164 ml, eine Zeitmessung zur Rückbildung der Flüssigkeitsvolumina erfolgt bei 82 ml – First Drain – und bei 123 ml – Half Life-Time. Die Dosierung der Biermenge erfolgt zeitgesteuert. Ein fester Treibgasdruck, welcher an der Anstichvorrichtung anliegt, fördert innerhalb einer bestimmten Zeit die geforderte Biermenge durch eine Düse in einen Glaszylinder. Der Druckabbau in der Düse schäumt das Bier durch Nukleation gelöster Gase auf.



**Abb. 4.3.: Aufschäumeinheit bestehend aus Magnetventil und Düse**



**Abb. 4.4.: Dosierzeiteinstellung mit werksseitiger Einstellung der vorgeschriebenen Biermenge**

#### **4.2.1.2. Temperaturkompensation**

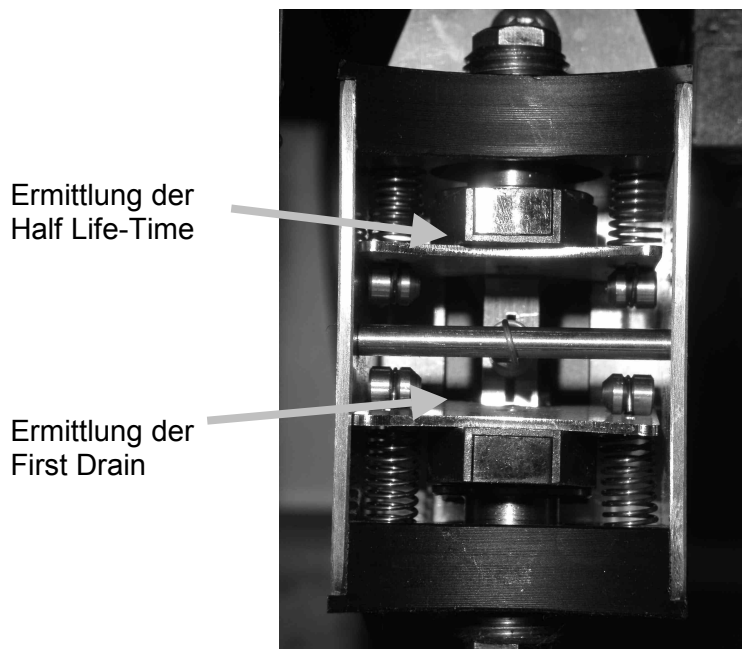
Der Zerfall eines Bierschaums ist temperaturabhängig. Im Gerät wird die Zeit bis zum Erreichen zwei verschiedener Volumina als First Drain und Half Life-Time gemessen. Im Zuge des Schaumzerfalls verlangsamt sich die Rückbildung von Bier aus den Schaum immer mehr. Diese drei Vorgaben führen zu folgender Grundüberlegung bei der Konstruktion der Temperaturkompensation:

Ein kalter Schaum zerfällt langsamer. Wird das Biervolumen erhöht, nimmt die Rückbildung bis zum Erreichen fester Schaltunkte weniger Zeit in Anspruch. Durch die schnellere Rückbildung der vergrößerten Biermenge wird die Verlangsamung des Schaumzerfalls aufgrund niedrigerer Temperaturen kompensiert. Als Referenztemperatur gilt 20 °C, gemessen durch ein Pt 100.

Die apparative Umsetzung erfolgt durch die Veränderung der Dosierzeit: temperaturabhängig wird die Grundschiwingung eines Quarzes (bei 20 °C) moduliert. Bei Temperaturen < 20 °C wird die Frequenz niedriger, so dass die Dosierzeit verlängert wird. Bei Temperaturen > 20 °C ist das umgekehrte der Fall. Die Volumenveränderung beträgt + 4,7 ml/°C bei  $t < 20\text{ °C}$ , entsprechend – 4,7 ml/°C bei  $t > 20\text{ °C}$ . Diese Volumina wurden empirisch ermittelt.

#### 4.2.1.3. Detektion der Zerfallszeiten

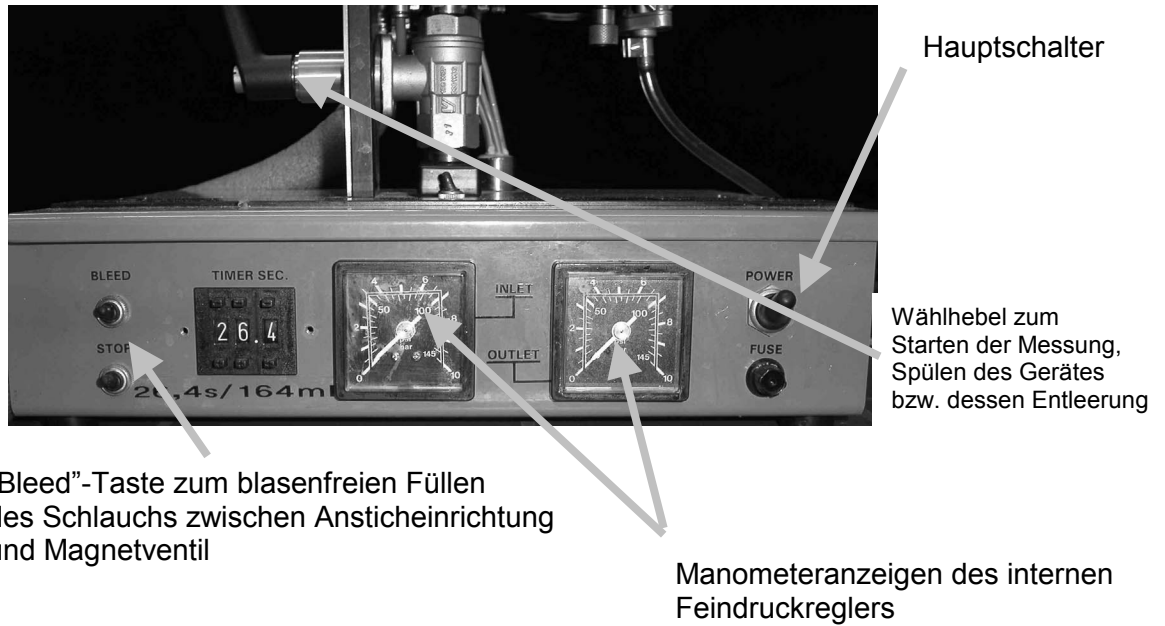
Mittels zweier Lichtschranken wird das Erreichen dieser beiden kennzeichnenden Volumina detektiert. Zwei baugleiche Lichtschranken emittieren Licht im Nah-Infrarot-Bereich, unterschieden wird in Transmission bzw. Reflektion der Strahlung. Fokussiert wird auf einen Punkt, der ca. 5 mm innerhalb der Biersäule liegt.



**Abb. 4.5.: Lichtschranken zur Messwertermittlung (ohne Glaszylinder)**

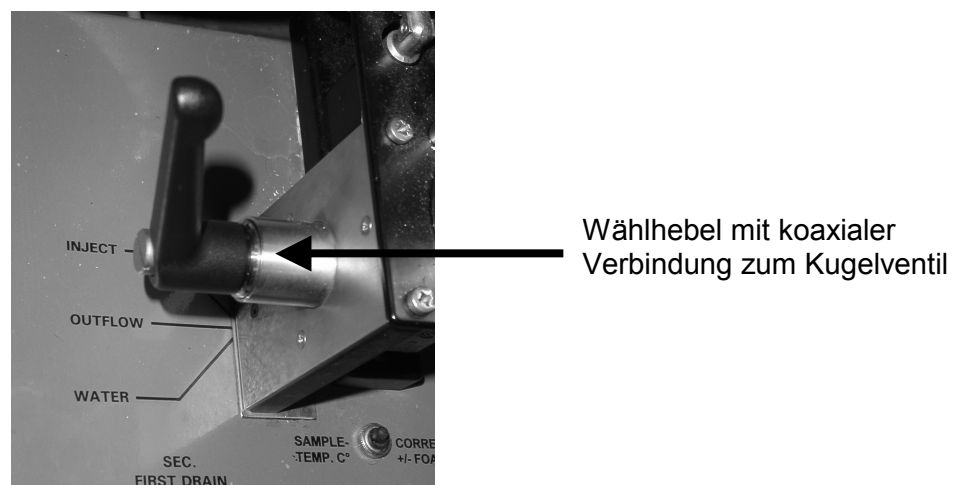
#### 4.2.1.4. Bedienung des Geräts

An der vorderen Seite des Gerätesockels befinden sich weitere Bedienelemente und Anzeigeelemente.



**Abb. 4.6.: Bedienungsleiste des Lg-Foamtesters**

Das Hauptbedienungselement ist der Wahlhebel, welcher ein Kugelventil unterhalb der Schaumsäule steuert und über Initiatoren elektronische Schaltvorgänge auslöst.

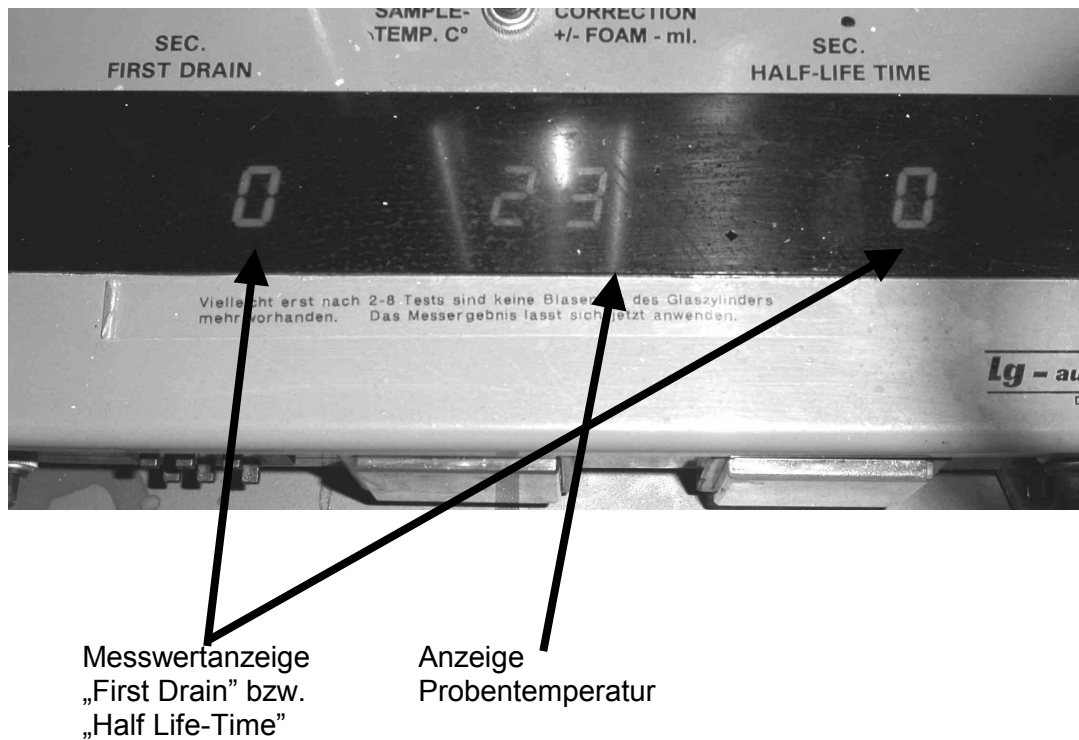


**Abb. 4.7.: Wählhebel**

Aus der senkrechten Position kann der Hebel jeweils um 90 ° in die Waagerechte gebracht werden. Die Position „Outflow“ dient zum Entleeren des Geräts, die Stellung „Inject“ zum Start der Messung, „Water“ spült das Gerät.

#### 4.2.1.5. Ablauf einer Messung

1. Anstechen der Probe und Druckbeaufschlagung der Flasche
2. Betätigen der „Bleed“-Taste zur blasenfreien Füllung des Verbindungsschlauchs bis zum Magnetventil
3. Spülen des Gerätes für 3 x 30 s mittels des Bedienhebels in Stellung „Water“
4. Stellung „Inject“, Einschäumen innerhalb der eingestellten Zeit von 26,4 s (bei 20 °C), nach Ende dieses Zeitraums Beginn der Zeitmessung „First Drain“
5. Mit Ende der „First Drain“-Zeitmessung; Beginn der Zeitmessung „Half Life-Time“
6. Nach Beendigung der Zählung „Half Life-Time“ Hebel in Stellung „Outflow“. Die Probe läuft durch einen Schlauch ab
7. Anzeige der Messwerte durch zwei LED-Anzeigen auf dem Gerätesockel (Abb. 4.8.)

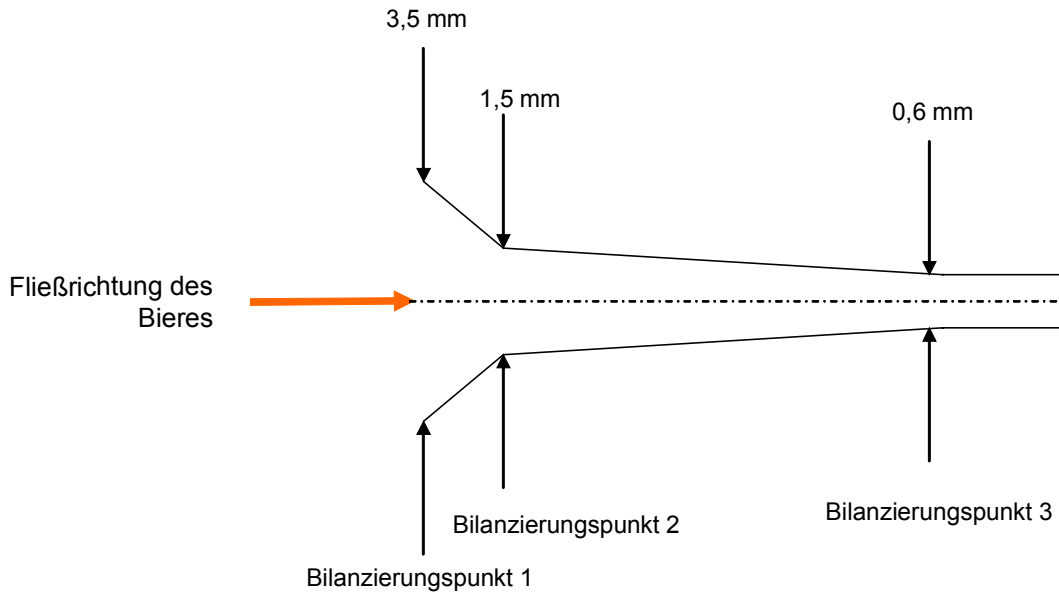


**Abb. 4.8.: Messwertanzeige**

8. Schließen der Treibgaszuführung zum Probebehälter
9. Zweimaliges Betätigen der „Bleed“-Taste zur Druckentlastung des Probebehälters

#### 4.2.1.6. Schauminduktion

Die Schauminduktion beim Lg-Foamtester erfolgt, wie erwähnt, durch eine Nukleation infolge eines Hochscherprozesses. Die Scherung erfolgt innerhalb einer Düse.



**Abb. 4.9.: Schematische Darstellung der Düse**

Die Flüssigkeit in der Düse durchläuft 2 konische Teile und einen zylindrischen Teil. Der folgenden Tabelle können die Maße der 3 Düsenteile entnommen werden:

**Tab. 4.1.: Maße der Düsenteile**

| Düsenteil          | Länge [mm] | Anfangs-<br>durchmesser<br>[mm] | End-<br>durchmesser<br>[mm] | Öffnungs-<br>winkel<br>[°] |
|--------------------|------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1. konischer Teil  | 1,7        | 3,5                             | 1,5                         | 60                         |
| 2. konischer Teil  | 8,3        | 1,5                             | 0,6                         | 3                          |
| zylindrischer Teil | 2,7        | 0,6                             | 0,6                         | 0                          |

Es liegt eine zweifache Konfuserströmung, gefolgt von einer Strömung durch ein zylindrisches Rohr, vor.

Infolge der Umwandlung statischen Drucks in kinetische Energie kommt es längs der Düsenkontur zu einem permanenten Druckabfall. Wird der Sättigungsdruck unterschritten, liegt eine 2-Phasenströmung vor. Aufgrund der vorliegenden hohen Strömungsenergie ist eine mechanisch induzierte CO<sub>2</sub>-Entbindung denkbar.

Die Druckabnahme im Verlauf der Strömung des Bieres durch die Düse induziert die Gasentbindung an der Stelle, an der der CO<sub>2</sub>-Sättigungsdruck des Bieres unterschritten wird. Ab dieser Stelle kommt es zu einer 2-Phasenströmung von Gas/Schaum und Flüssigkeit. Die mathematische Beschreibung dieser Konfusorenströmung ist mathematisch nur mit großer Unsicherheit möglich.

Die Differenzierung mittels fluiddynamischer Kennzahlen soll an den Bilanzpunkten in Abb. 4.9. mit 3 verschiedenen Biersorten erfolgen.

Die Durchströmung beim eingesetzten Gerät betrug 164 ml Bier innerhalb von 26,4 s. Zur Berechnung der Strömungsverhältnisse wurden folgende Formeln verwendet:

#### **Schwergeschwindigkeit**

$$\dot{\gamma} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot R^3} \quad \text{(Gleichung 4.1.)}$$

#### **Fließgeschwindigkeit**

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \quad \text{(Gleichung 4.2.)}$$

**Reynoldszahl** (zur Charakterisierung einer 1-Phasenströmung)

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad \text{(Gleichung 4.3.)}$$

**Weberzahl** (zur Charakterisierung einer 2-Phasenströmung (Gas/Flüssigkeit))

$$We = \frac{v^2 \cdot d \cdot \rho}{\sigma} \quad \text{(Gleichung 4.4.)}$$

**Abfall des dynamischen Drucks am Ende des Bilanzabschnittes**

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad \text{(Gleichung 4.5.)}$$

**Tab. 4.2.: Kennzahlen des Fließverhaltens in der Düse**

| Bilanzpunkt | Bier-sorte  | Scherge-schwindigkeit<br>[s <sup>-1</sup> ] | Strömungs-geschwindigkeit<br>[m/s] | Reynolds-zahl | Weber-zahl | Δp <sub>dyn</sub><br>[Pa] |
|-------------|-------------|---------------------------------------------|------------------------------------|---------------|------------|---------------------------|
| 1           | Pilsener    | 1476                                        | 0,64                               | 1728          | 36         | ~ 205                     |
|             | Hefeweizen  |                                             |                                    | 1270          | 34         |                           |
|             | Schwarzbier |                                             |                                    | 1455          | 41         |                           |
| 2           | Pilsener    | 18749                                       | 3,52                               | 4073          | 462        | ~ 6200                    |
|             | Hefeweizen  |                                             |                                    | 2922          | 435        |                           |
|             | Schwarzbier |                                             |                                    | 3430          | 535        |                           |
| 3           | Pilsener    | 292945                                      | 21,97                              | 10169         | 7198       | ~ 241000                  |
|             | Hefeweizen  |                                             |                                    | 7296          | 6781       |                           |
|             | Schwarzbier |                                             |                                    | 8563          | 8338       |                           |

Aufgrund der ermittelten Schergeschwindigkeit kann gesagt werden, dass der Aufschäumvorgang einen Hochscherprozess darstellt, der in dieser Intensität im Lebensmittelbereich nicht vorliegt. Deshalb stellt sich beim Aufschäumvorgang in der Düse biersortenabhängig ein spezifisches Strömungsfeld ein.

Ferner wird deutlich, dass in der Düse die Reynoldszahl analog einer geometrischen Reihe ansteigt und biersortenabhängig vorliegt.

Es ist wegen der kreisrunden Konfusorgeometrie der Düse davon auszugehen, dass weitere Strömungseffekte wie eine überlagerte Wirbelströmung zur Senke vorliegen und die Schaumbildung aufgrund der Korrelation von Geschwindigkeit und Schergeschwindigkeit nach der Formel:

$$\dot{\gamma} = \frac{8 \cdot v}{d_{Düse}} \quad \text{(Gleichung 4.6.)}$$

induziert wird.

Der Einfluss des Entspannungseffektes kann wie folgt formal beschrieben werden:

$$v = f \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad \text{(Gleichung 4.7.)}$$

Bei Ansatz der Gleichungen 4.2. und 4.7. werden Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten festgestellt, welche der folgenden Tabelle zu entnehmen sind:

**Tab. 4.3.: Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeiten aus Düsenaustritt**

|             | Strömungsgeschwindigkeit [m/s] nach Ansatz |                |
|-------------|--------------------------------------------|----------------|
|             | Gleichung 4.2.                             | Gleichung 4.7. |
| Pilsener    | 21,97                                      | 18,95          |
| Hefeweizen  |                                            | 18,93          |
| Schwarzbier |                                            | 18,91          |

Die Differenz der ermittelten Geschwindigkeiten steht für ein überkritisches Verhalten in der Düse am Beispiel einer expansiven Strömung (Inkompressibilität, Volumenprogression).

#### **4.2.1.7. Kalibrierung des Messgeräts**

Die Kalibrierung des Gerätes erfolgt bisher nach folgendem Prozedere:

1. Ein „Standard“-Bier, welches aus einer Brauerei in der Nähe der Herstellerfirma stammt, wird bei vorgegebenen Druck (2,5 bzw. 4,0 bar) in einen separaten, austarierten Zylinder aufgeschäumt.
2. Die aufgeschäumte Biermenge wird gewogen und daraus das Volumen – im Verhältnis 1:1 (ohne Beachtung möglicher Dichteunterschiede) – in ml bestimmt.
3. Durch das mehrmalige Wiederholen dieser Vorgehensweise wird eine gewisse statistische Sicherheit erreicht.
4. Durch eine Dreisatzrechnung wird die Zeit bestimmt, welche benötigt wird, die vorgeschriebene Menge von 164 ml durch die Düse in den Messzylinder zu drücken.
5. Die Kalibrierung der Lichtschranken erfolgt anhand der für des „Standard“-Bier ermittelten Messwerte.

#### **4.2.2. Ross & Clark**

Die Messungen nach Ross & Clark wurden nach Analysen der MEBAK (**Mittel-Europäische Brautechnische Analysen-Kommission**) Kapitel 2.19.1 durchgeführt.

Bei vergleichenden Untersuchungen wurde darauf geachtet, dass die Analyse von verschiedenen – gründlich eingearbeiteten Laboranten – durchgeführt wurde.

Das zum Aufschäumen eingesetzte Kohlendioxid hatte die Reinheit > 99,995 Vol.-% (Messer-Griessheim).

Die Reinigung der verwendeten Glasgeräte wurde mittels Chromschwefelsäure durchgeführt.

Eine Kalibrierung der eingesetzten Fritten erfolgte durch eine Vergleichsmessung mit der Staatlichen Prüf- und Versuchsanstalt, Weihenstephan.

Eine Abbildung des Messplatzes ist in Kap. 3.6.2. (Abb. 3.19.) zu sehen.

#### **4.2.3. NIBEM-Methode**

Die NIBEM-Methode wurden ebenfalls nach Analysenvorschrift der MEBAK (Kap. 2.19.2) durchgeführt.

Abweichend davon war das Gerät in einen Kühlschrank eingebracht, um eine konstante Temperatur von 20 °C zu gewährleisten.

Als Treibgas wurde CO<sub>2</sub> der genannten Reinheitsklasse verwendet.

Das Messgerät entstammt der neusten Generation, dessen Markteinführung im Jahre 2001 stattfand.



**Abb. 4.10.: NIBEM-T Foamtester**

#### **4.2.4. Eigenentwicklung**

Die Funktionsweise der Eigenentwicklung stellt einen maßgeblichen Teil der gewonnenen Erkenntnisse dar. Deshalb ist die genaue Beschreibung der Funktion des neuen Gerätes in Kap. 8.3. zu finden.

### **4.3. Periphere physikalische Untersuchungen**

#### **4.3.1. Viskositätsverhalten**

##### **4.3.1.1. Kapillarmessungen**

Die Messung der Viskosität erfolgte durch ein Kapillarviskosimeter (Ubbelohde-Viskosimeter). Dies Gerät ermittelt die kinematische Viskosität Newtonscher Flüssigkeiten.

Fabrikat: Schott

Typ: CT 1150

Kapillareigenschaften:

- Typ 51713 /1C
- Kapillarvolumen: 2 ml
- App.-Nr. 60800
- Kapillarkonstante: 0,03032

Die Untersuchung des Viskositäteinflusses wurde mit einer Lösung aus dest. Wasser und 5 Vol.-% Ethanol (p.a.; Merck-Nr. 983) durchgeführt.

Die Viskositäterhöhung wurde durch den Zusatz von Ethylenglycol (zur Synthese; Merck-Nr. 822329) durchgeführt. Um die gewünschten Viskositätsstufen zu erreichen wurde eine Vorlage von 0, 10, 15, 20, 25, 30 und 35 Vol.-% Ethylenglycol mit dem Wasser-Ethanol-Gemisch aufgefüllt.

##### **4.3.1.2. Rotationsviskosimetrie mittels Zylindermessverfahren**

Zur Feststellung der Temperaturabhängigkeit des Viskositätsverhaltens und der weiteren Abhängigkeit von der Scherrate wurden Untersuchungen mit einer Zylindermesseinrichtung durchgeführt.

Zur Probenvorbereitung wurden die Biere der Kühllagerung entnommen und ca. 50 ml in ein 100 ml-Becherglas überführt. Im Ultraschallbad bei 20 °C wurde das Bier für 15 min entgast.

Das erforderliche Probenvolumen (17 ml) wurde mittels Pipette in das vortemperierte Messsystem eingefüllt. Die Kühlung des Systems erfolgte durch eine Peltierkühlung.

Bei dieser Messreihe wurden folgende Messvorgabe gestellt:

| Abschnitt | Zeit [s] | Scherrate [ $s^{-1}$ ] |
|-----------|----------|------------------------|
| 1         | 30       | 0,1...100              |
| 2         | 30       | 100...0,1              |

Auf die Vorgabe einer Rampe zur Thixotropiebestimmung sowie ein Vorscheren wurde verzichtet. Regressiert werden die Werte der Rücklaufkurve.

#### **4.3.2. Oberflächenspannung**

Zur Bestimmung der Oberflächenspannung wurden zwei verschiedene Messapparaturen verwendet.

Der Einfluß nicht-ionischer Tenside auf die Schaumstabilität bei Verwendung als Reinigungsmittelzusatz in der Flaschenwaschmaschine wurde mittels eines Tensiometers, Fabrikat Krüss (Typ: K12), ermittelt. Es wurde mit der Ringmethode gearbeitet.

Die Messung der Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung erfordert eine deutliche höhere Genauigkeit. Als Messverfahren wurde ebenfalls die Ringmethode (Fabrikat des Tensiometers: Krüss, Interfacial Tensiometer K8) gewählt.

Zu Beginn der Versuchsdurchführung wurde das Bier ca. 10 Minuten im Ultraschallbad entgast. Im Tensiometer erfolgte eine Temperierung für weitere 10 min.

Die Genauigkeit der Temperatur kann mit  $\pm 0,5$  K angegeben werden.

#### **4.3.3. Dichte**

Die Dichte des Bieres bzw. Stammwürzebestimmung der Biere erfolgte mittels eines Biegeschwingers, Fa. Anton Paar, Fabrikat DMA 4500 .

Technische Daten des Biegeschwingers:

- Dichtemessbereich: 0,6 bis 2,0 g/cm<sup>3</sup>
- Temperaturbereich: 5 bis 70 °C
- Viskositätsbereich: 0,1 bis 10.000 mPas
- Eichfehlergrenze: 0,0002 g/cm<sup>3</sup>

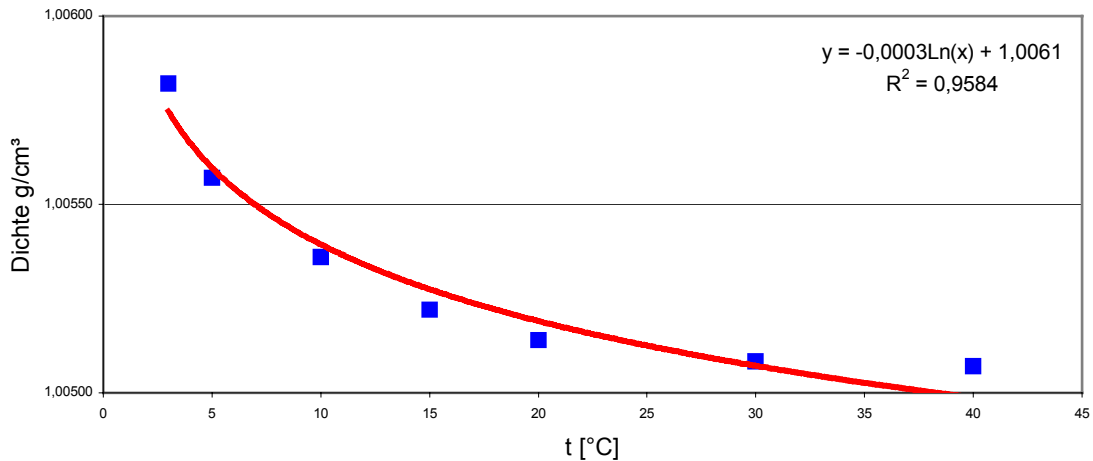
Es wurde arithmetische Mittel einer Doppelbestimmung als Messwert genommen.

## 5. Ergebnisse

### 5.1. Fluidynamische Kennwerte wichtiger Biersorten

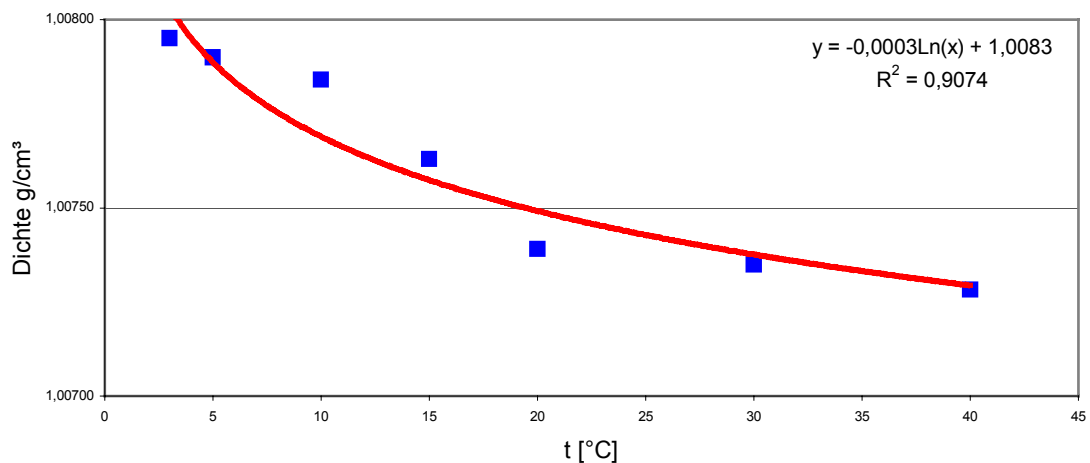
#### 5.1.1. Dichte

Es wurden zwei Biere (1 Pilsener, 1 Hefeweizen) hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit der Dichte untersucht. Dabei zeigten sich folgende Ergebnisse:



**Abb. 5.1.:** Temperaturabhängigkeit der Dichte eines Pilsener Bieres

Für ein Hefeweizen ergeben sich veränderte Werte:



**Abb. 5.2.:** Temperaturabhängigkeit der Dichte eines Hefeweizenbieres

Insgesamt ist die Dichte des Weizenbieres höher, was durch die Brauart mit höherem Stammwürzegehalt begründet ist.

Die Abnahme der Dichte ist bei beiden Bieren als nahezu konstant zu betrachten. Die statistische Auswertung der Dichte als Funktion der Temperatur ergibt eine exponentielle Korrelation:

Pilsener Bier:  $-0,0003\ln(x) + 1,0061$  ( $r = 0,9790$ ;  $s = 0,00081$ )

Hefeweizen:  $-0,0003\ln(x) + 1,0083$  ( $r = 0,9526$ ;  $s = 0,00085$ )

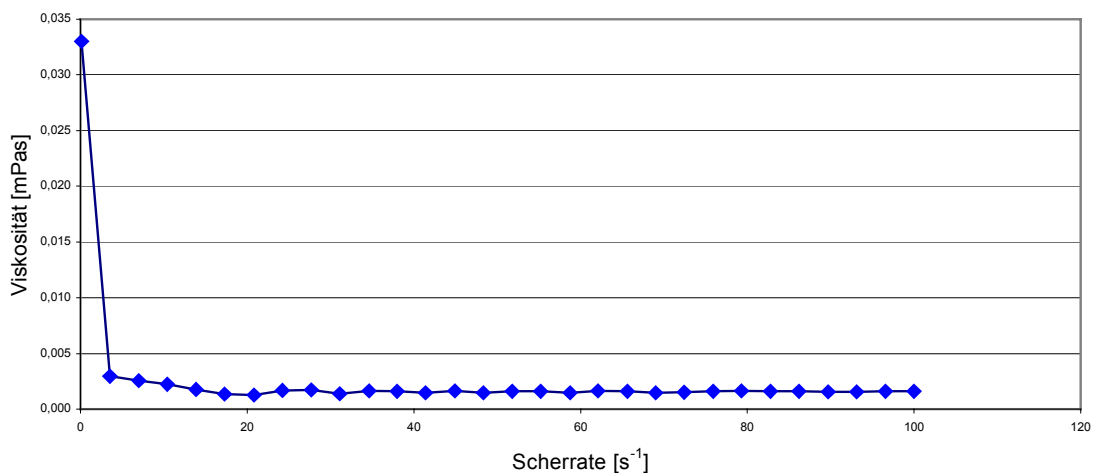
Es wird deutlich, dass die Dichteverringerung mit steigender Temperatur sich lediglich durch das Absolutglied unterscheidet.

## 5.1.2. Viskositätsverhalten

### 5.1.2.1. Viskositätsverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur

Das Viskositätsverhalten des Pilsener Bieres sowie des Weizenbieres wurde hinsichtlich seiner Temperaturabhängigkeit und der möglichen Abhängigkeit von der Scherrate  $\dot{\gamma}$  untersucht.

Dies wurde bei verschiedenen Temperaturen (0, 5, 10, 15 und 20 °C) vermessen. In Abb. 5.3. ist die Viskositätsfunktion in Abhängigkeit von der Scherrate dargestellt ( $T = 293$  K)



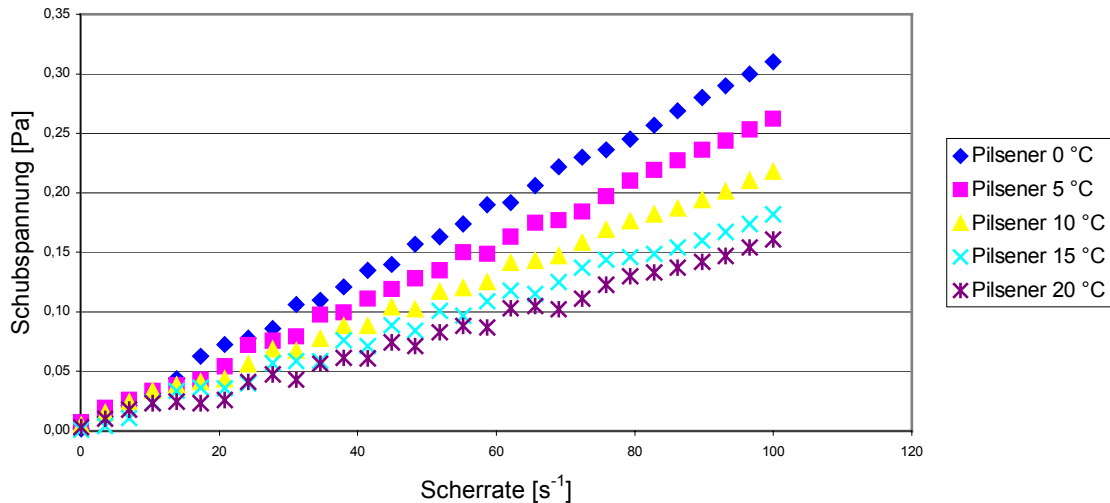
**Abb. 5.3.: Viskositätskurve eines Pilsener Bieres**

Messpunkt 1 ist als Ausreißer zu betrachten. Erst ab einer Scherrate  $> 20 s^{-1}$  kann ein Einschwingen des Messsignals beobachtet werden. Damit werden die Messungen von Tscheuschner bestätigt, der eine geringe nicht-Newtonsche Abweichung ( $r = 0,999$ ) feststellte.

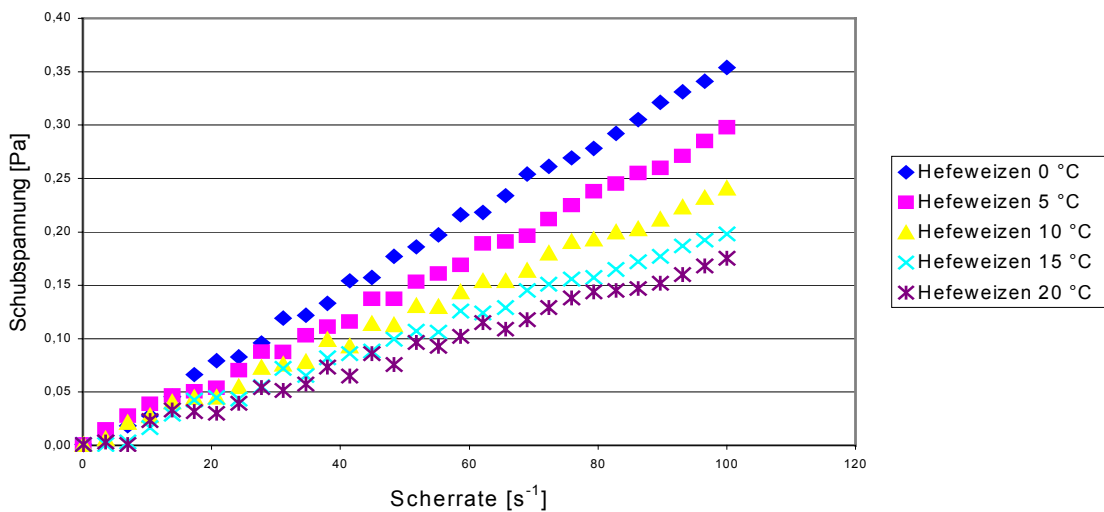
Anhand der Messergebnisse müssen die mittels Rotationsviskosimeter vermessenen Biere im teilorheologisch/technologisch relevanten

Schergeschwindigkeitsbereich als rheostabile Flüssigkeiten mit Newtonschen Fließverhalten charakterisiert werden.

Wird die Schubspannung über der Scherrate aufgetragen, so ergibt sich mit sinkender Proben­temperatur eine steigende Schubspannung.



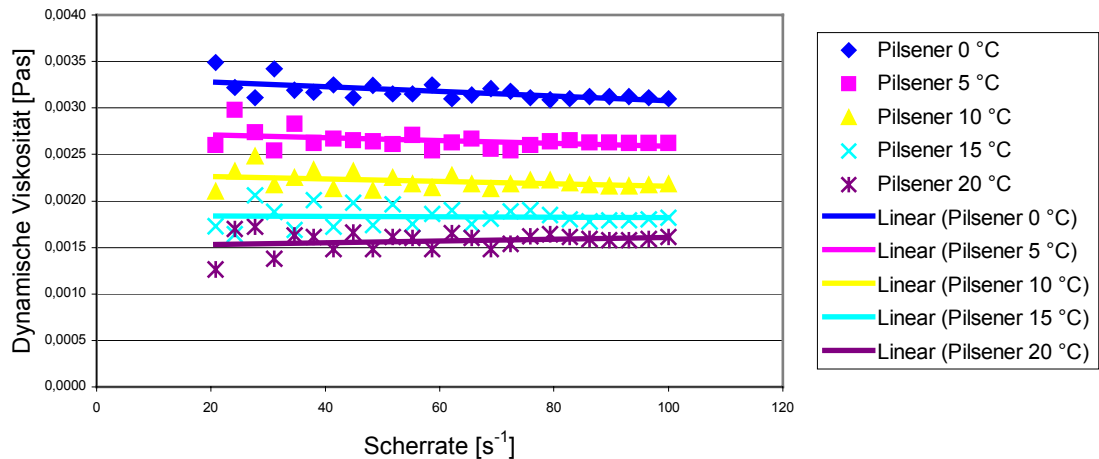
**Abb. 5.4.: Rheogramm eines Pilsener Bieres**



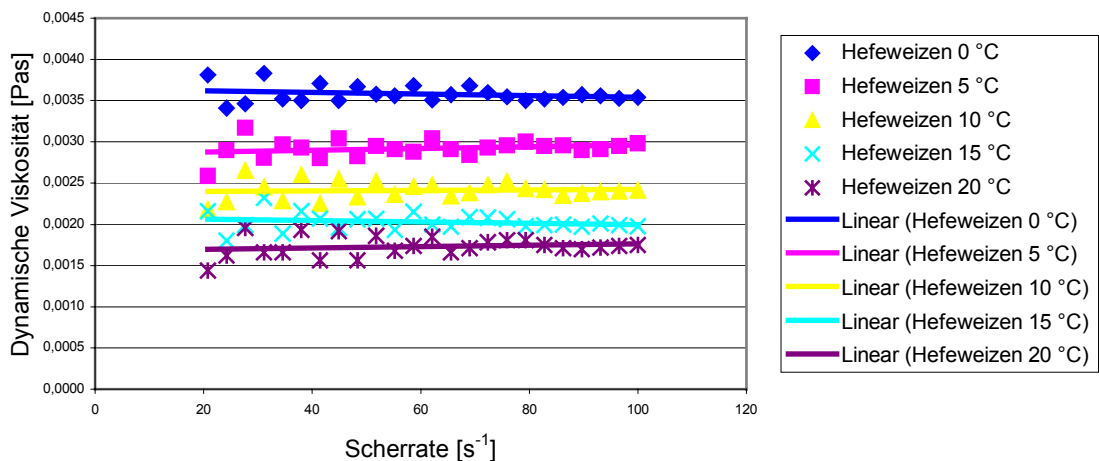
**Abb. 5.5.: Rheogramm eines Hefeweizenbieres**

Die klare Abhängigkeit der Schubspannung von der Scherrate mit steigender Temperatur wird für beide Biere deutlich.

Nachfolgend sind die Viskositätsfunktionen der Biere aus Abb. 5.4. und 5.5. enthalten ( $20 \leq \dot{\gamma} \leq 100 \text{ s}^{-1}$ ). Ein konstanter Viskositätsverlauf wird im dargestellten Messbereich mit steigender Temperatur und steigender Scherrate gefunden.



**Abb. 5.6.: Dynamische Viskosität in Abhängigkeit von der Scherrate (Pilsener Bier)**



**Abb. 5.7.: Dynamische Viskosität in Abhängigkeit von der Scherrate (Hefeweizen)**

Da das zulässige Messmoment eingehalten wurde, ist der Viskositätsverlauf ein Indikator für eine minimale Strukturierung.

In der Brauereitechnologie liegt während des hydraulischen Transports, Kühlen und Abfüllen eine Scherrate vom  $> 100 \text{ s}^{-1}$  vor. Newtonsches Fließverhalten sollte daher weiterhin angenommen werden.

Das Niveau der dynamischen Viskosität kann temperaturabhängig beschrieben werden.

**Tab. 5.1.: Messdaten bei der Feststellung des temperaturabhängigen Viskositätsverhaltens**

| t<br>[°C] | Pilsener Bier                     |                  |                         | Hefeweizen                        |                  |                         |
|-----------|-----------------------------------|------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------|-------------------------|
|           | Dynamische Viskosität<br>[Pa • s] | Mittlerer Fehler | Korrelationskoeffizient | Dynamische Viskosität<br>[Pa • s] | Mittlerer Fehler | Korrelationskoeffizient |
| 0         | 0,003227                          | -0,002899        | 0,99914                 | 0,003507                          | 0,002829         | 0,99872                 |
| 5         | 0,002682                          | -0,001996        | 0,99839                 | 0,002826                          | 0,005622         | 0,99813                 |
| 10        | 0,002221                          | -0,000591        | 0,99774                 | 0,002390                          | 0,002007         | 0,99688                 |
| 15        | 0,001458                          | 0,019396         | 0,99566                 | 0,001129                          | 0,046283         | 0,99511                 |
| 20        | 0,001419                          | 0,008415         | 0,99443                 | 0,001094                          | 0,034213         | 0,99377                 |

#### 5.1.2.2. Ermittlung der Fließaktivierungsenergie

Die nachfolgende Betrachtung dient der Ermittlung der Temperaturabhängigkeit der dynamischen Viskosität. Nach dem Fließgesetz von Frenkel-Eyring läßt sich mittels des Ansatzes:

$$\eta(T) = A_s \cdot e^{\frac{E_A}{R \cdot T}} \quad \text{(Gleichung 5.1.)}$$

die dynamische Viskosität im untersuchten Temperaturbereich ableiten /95/.

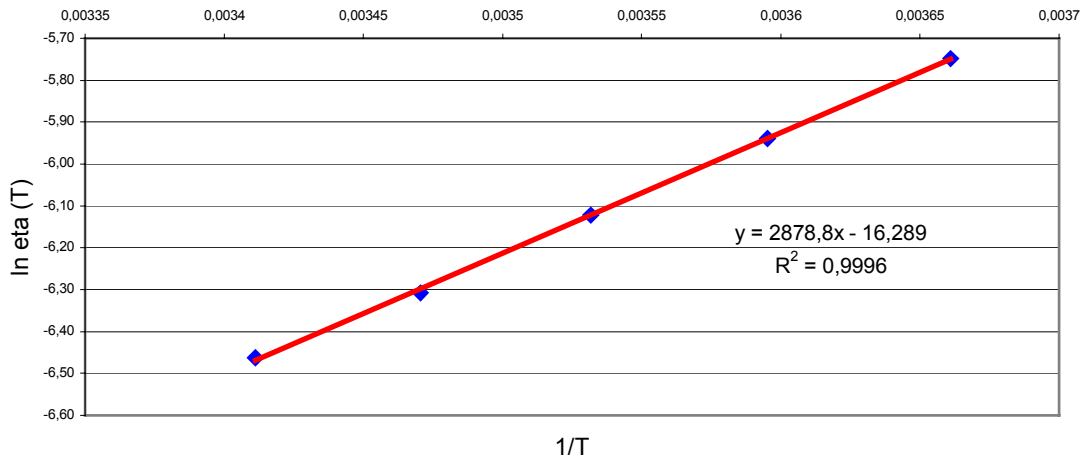
Die Berechnung der Stoffkonstante  $A_s$  und die Fließaktivierungsenergie  $E_A$  müssen erfolgen. Innerhalb einer graphischen Auswertung läßt sich dies durch einen einfachen Koeffizientenvergleich bestimmen.

Nach der Logarithmierung der gemessenen dynamischen Viskositäten  $\eta(T)$  (Ordinate) und der Berechnung der reziproken Temperatur  $1/T$  (Abszisse) werden die Daten in einem Koordinatensystem aufgetragen.

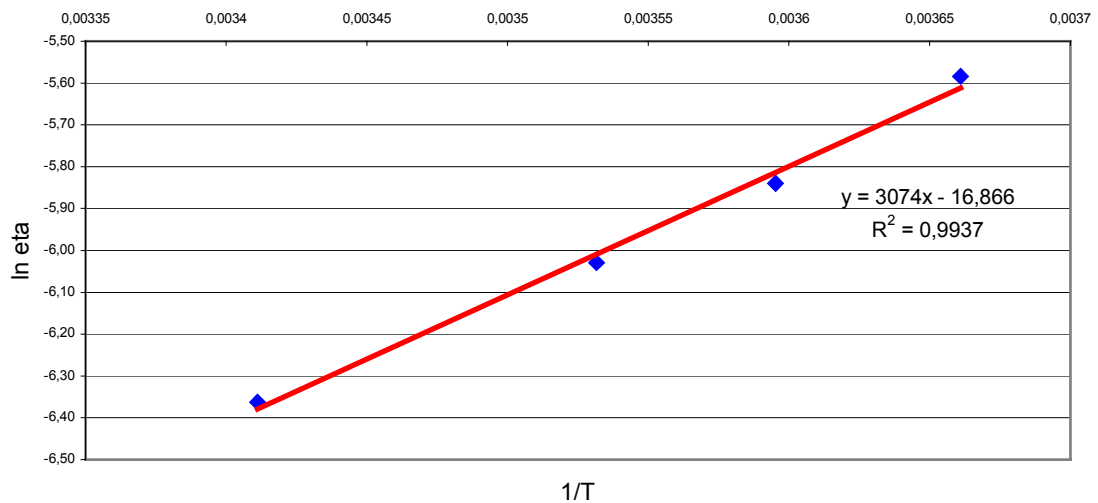
Durch die bereits erfolgte logarithmische Auswertung kann eine lineare Regressionsgerade vom Typ  $y = mx + b$  durch die Punkte gelegt werden.

Die Werte für  $m$  (Steigung) entspricht dem Wert  $E_A/R$ . Die Stoffkonstante  $A_s$  wird durch den Schnittpunkt mit der Ordinate ermittelt.

Exemplarisch wurde die Ermittlung der Fließaktivierungsenergie und der Stoffkonstante ebenfalls für ein Pilsener Bier und ein Hefeweizen durchgeführt.



**Abb. 5.8.: Temperaturabhängigkeit der dynamischen Viskosität nach Frenkel-Eyring (Pilsener)**  
**(n = 5 Wertepaare,  $\alpha = 0,1 \%$  (\*\*\*))**



**Abb. 5.9.: Temperaturabhängigkeit der dynamischen Viskosität nach Frenkel-Eyring (Hefeweizen)**  
**(n = 4 Wertepaare,  $\alpha = 0,1 \%$  (\*\*\*))**

Die Regressionsgeraden lassen sich durch die Parameter:

Pilsener :  $\ln \eta(T) = 2878,8T - 16,289$

Hefeweizen:  $\ln \eta(T) = 3074,0T - 16,866$

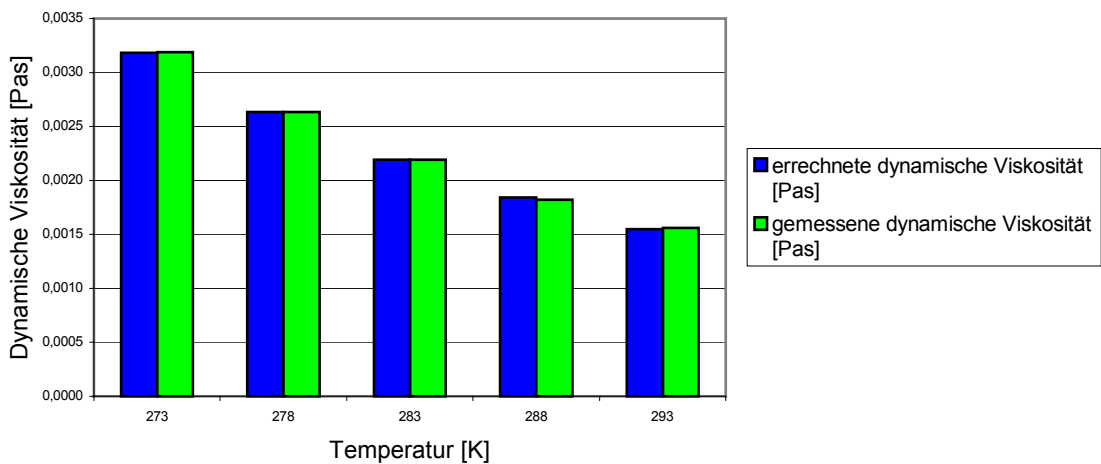
beschreiben.

Daraus ergeben sich folgende Werte für die Fließaktivierungsenergie und Stoffkonstante nach Entlogarithmierung:

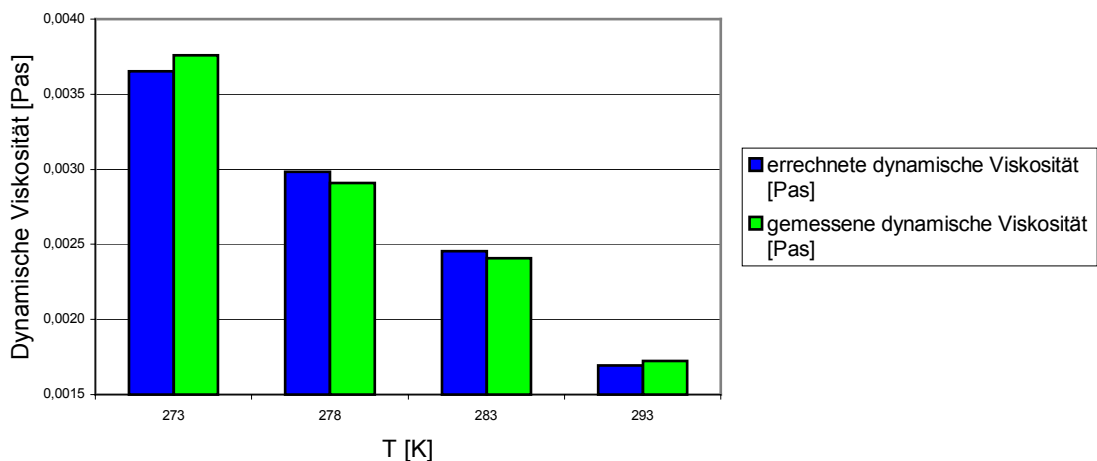
**Tab. 5.2.: Ermittelte Stoffkonstanten nach dem Fließgesetz von Frenkel-Eyring**

|                                        | Pilsener          | Hefeweizen        |
|----------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Stoffkonstante $A_S$ [Pa • s]          | $8 \cdot 10^{-8}$ | $5 \cdot 10^{-8}$ |
| Fließaktivierungsenergie $E_A$ [J/mol] | 23935             | 25558             |

Zur Kontrolle, ob die errechneten Ergebnisse mit den Messwerten der dynamischen Viskosität übereinstimmen, werden die Werte bei den entsprechenden Temperaturstufen nochmals miteinander verglichen.



**Abb. 5.10.: Vergleich der errechneten und gemessenen dynamischen Viskosität bei steigender Temperatur (Pilsener)**



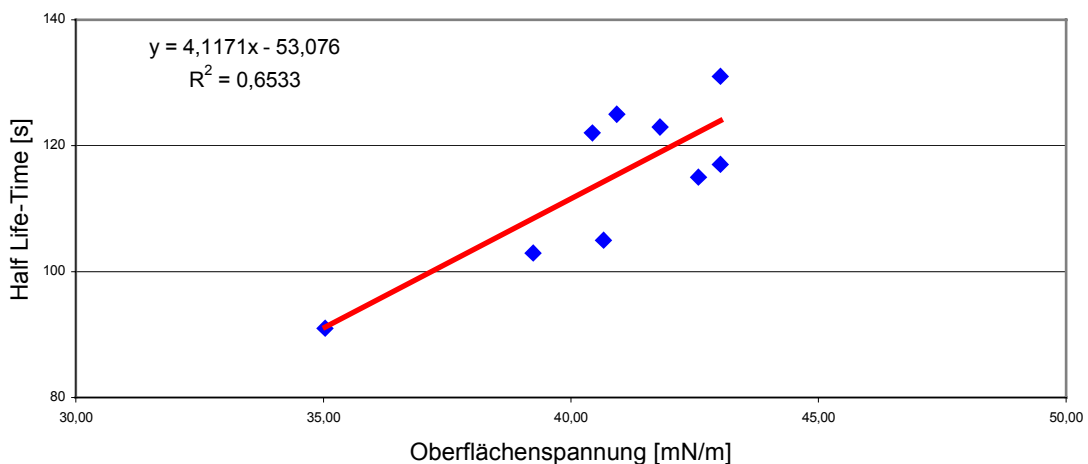
**Abb. 5.11.: Vergleich der errechneten und gemessenen dynamischen Viskosität bei steigender Temperatur (Hefeweizen)**

### 5.1.3. Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung wird durch im Bier enthaltene oberflächenaktive Substanzen herabgesetzt. Bier hat eine Oberflächenspannung, welche in der Größenordnung von ca. 40 bis 50 mN/m anzusiedeln ist, reines Wasser bei 20 °C 72,8 mN/m.

Für die Oberflächenspannung ist jedoch ein optimaler Bereich ermittelt worden (41 bis 44 mN/m). Nimmt die Oberflächenspannung einen zu geringen Wert an, wirkt sich dies negativ auf den Schaum aus. Dies ist durch die Untersuchungen mit einem oberflächenaktiven Reinigungsmittelzusatz belegt.

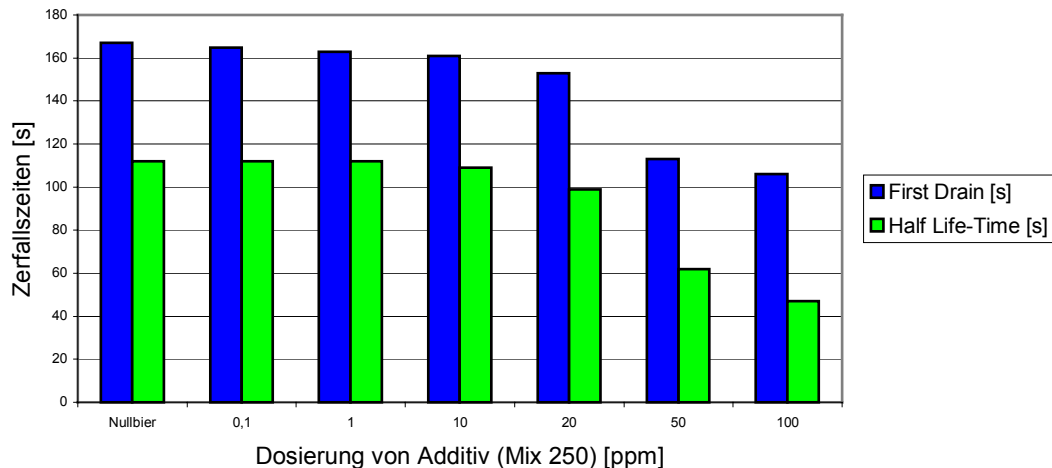
Untersuchungen von Schaumstabilität im Vergleich zur Oberflächenspannung zeigen, dass Biere mit einem Wert von ca. 35 mN/m eine schlechtere Schaumstabilität besitzen.



**Abb. 5.12.: Schaumstabilität in Abhängigkeit von der Oberflächenspannung**  
(n = 8 Wertepaare,  $\alpha = 0,27\%$  (\*\*)/96/)

Oberflächenaktive Substanzen besitzen für den Schaum eine negative wie positive Bedeutung, da sich diese selektiv im Schaum anreichern.

Der Einfluss einer herabgesetzten Oberflächenspannung auf die Schaumstabilität wurde durch die Dosierung eines Flaschenreinigungsmittel-Additivs zum Bier in steigenden Konzentrationen durchgeführt. Hierzu wurde ein Mittel (Produktname: Mix 250, Fa. Sopura-Chemie GmbH) verwendet. Nach Herstellerangabe enthält dieses Produkt 15 – 30 % nicht-ionische Tenside (nähere Auskünfte wurden nicht erteilt).



**Abb. 5.13.: Einfluss oberflächenaktiver Substanzen auf die Schaumstabilität**

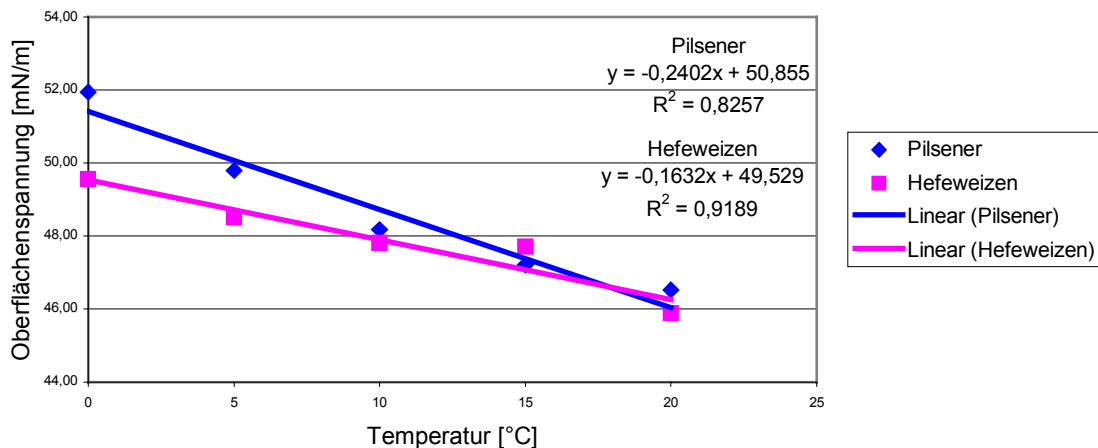
Eine steigende Konzentration nicht-ionischer Tenside wird bis zu einem bestimmten Maß hinsichtlich der Schaumstabilität toleriert, bei weiterer Konzentrationssteigerung sind Einbußen zu beobachten. Eine künstliche Herabsetzung der Oberflächenspannung durch Zusatz nicht-ionischer Tenside wirkt sich auf die First Drain-Zeit prozentual weniger stark aus als auf die Half Life-Time. Die Beobachtungen der verschiedenen deutlichen Einflüsse der Oberflächenspannung auf First Drain bzw. Half Life-Time sind somit bestätigt.

Die Untersuchung der Oberflächenspannungsverhaltens mit steigenden Temperaturen eines Pilsener Bieres und eines Hefeweizenbieres sollte zeigen, ob signifikante Veränderungen bei Temperaturen von 0 bis 20 °C festzustellen sind.

Die Korrelation von Oberflächenspannung und Schaumhaltbarkeit zeigt dies deutlich. Wird ein Wert von 40 mN/m unterschritten, ist mit hoher Sicherheit davon auszugehen, dass sich oberflächenaktive Substanzen im Bier befinden. Diese können sowohl aus der Reinigung der Gefäße als auch der Gebinde stammen.

Die Überschreitung der „kritischen Mizellbildungskonzentration“ (CMC, critical micelization concentration) ist besonders negativ. Die Dosierung oberflächenaktiver Substanzen über diesen Wert bringt hinsichtlich der Reinigungswirkung keinen Vorteil. Die Ausspülbarkeit dieser Substanzen wird erschwert [97].

Ferner zeigt sich, dass die Konzentration, welche vom Bier nicht mehr toleriert wird, gleichzeitig die Nachweisgrenze mittels Küvettentest bildet.



**Abb. 5.14.: Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung**

**(je 5 Wertepaare; Pilsener  $\alpha = 1 \%$ , (\*); Hefeweizen  $\alpha = 0,1 \%$  (\*\*))**

Die temperaturabhängige Veränderung der Oberflächenspannung fällt bei Pilsener Bier stärker aus als bei Hefeweizen. Eine Begründung liegt möglicherweise im höheren Gehalt von isomerisierten Hopfenbitterstoffen im Pilsener Bier.

Die Verschlechterung der Schaumwerte bei steigender Temperatur ist somit nicht nur über Veränderungen des Viskositätsverhaltens zu erklären, sondern kann auch durch die Verschiebung der Oberflächenspannung teilweise mit begründet werden.

Die Zuordnung der Oberflächenspannung in den Anforderungen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt unterstreicht den genannten Bereich der Oberflächenspannung für Bier mit Werten von 41 bis 50 mN/m /98/. Die Angaben sind jedoch nicht sortendifferenziert, da bei Pilsener Bieren mehr oberflächenaktive Bitterstoffe enthalten sind, bei Hefeweizen mehr Proteine.

Die verschiedenen Materialkennwerte zeigen den Einfluss der Umgebungstemperatur. Eine steigende Temperatur hat einen Einfluss auf die drainagebeeinflussenden Faktoren  $\eta$  und  $\rho$ , die Drainage wird beschleunigt. Für den Vorgang der Disproportionierung gilt dies für die Oberflächenspannung und ihrem Einfluß auf den Blasengröße und den  $\text{CO}_2$ -Gehalt.

## 5.2. Vergleichende Schaummessung

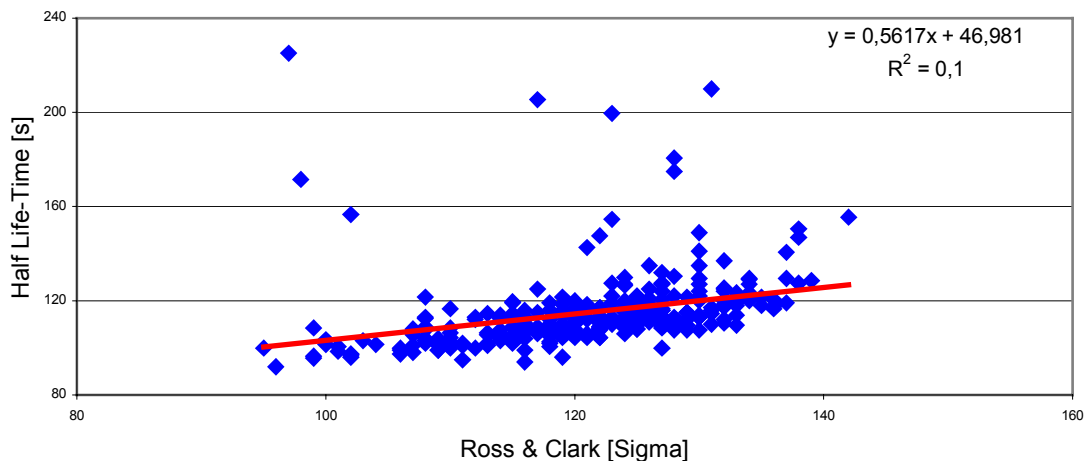
Eine durchgängige Untersuchung der Korrelation zwischen den Messwerten nach Ross & Clark und Lg-Foamtester wurde innerhalb der DLG-Untersuchung im Jahr 2001 durchgeführt.

### 5.2.1. Lg-Foamtester im Vergleich zur Schaummessung nach Ross & Clark

Die Messmethode nach Ross & Clark ist hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wie erwähnt als Referenzmethode zu betrachten. Die neue Methode der Schaummessung wird bei ihrer Einführung bzw. Vorstellung einer Vergleichsuntersuchung mit Ross & Clark unterzogen.

Die Ergebnisangabe des Lg-Foamtesters findet, wie bereits in Kap. 4.2.1. beschrieben, in 2 Werten statt. Die First Drain-Zeit ist zu dieser Auswertung nicht herangezogen worden, da die Half Life-Time (Halbwertszeit) dem nach Ross & Clark festgestellten  $\Sigma$ -Wert entsprechen sollte /102/.

Während dieser Analysenreihe wurden Schäume von Bieren annähernd jeder Brauart gemessen, es zeigte sich das folgende Bild:



**Abb. 5.15.: Korrelation zwischen Ross & Clark und Half Life-Time Lg-Foamtester**  
(n = 315 Wertepaare,  $\alpha = 0,1 \%$  (\*\*\*))

Die Korrelation zwischen beiden Methoden mit einem Wert von 0,3162 ist bereits als sehr signifikant zu bezeichnen. Diese Signifikanz ist jedoch in hohem Maß durch die große Anzahl der Wertepaare begründet.

Die graphische Betrachtung zeigt jedoch, dass in der gesamten Menge von 314 Wertepaaren lediglich einige wenige Ausreißer die Korrelationsgerade entscheidend verschieben.

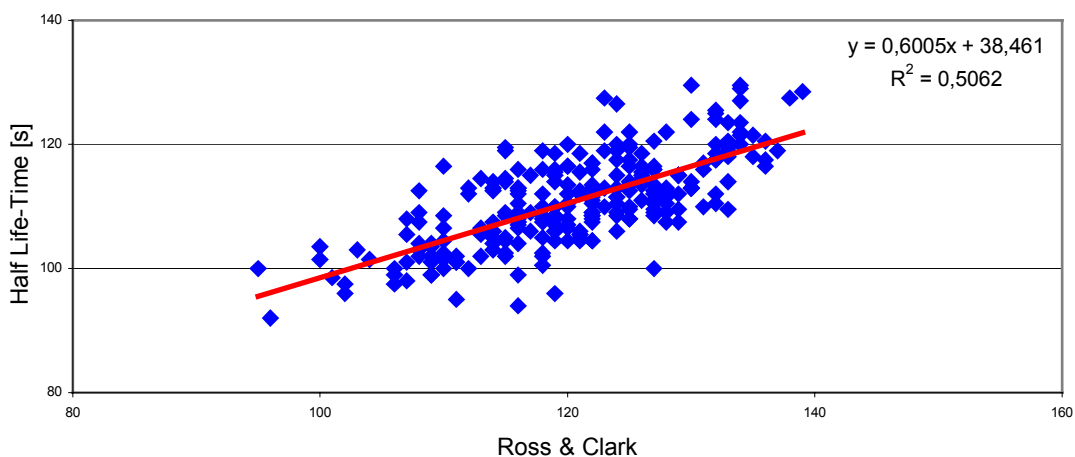
Bei der tabellarischen Auswertung der Messergebnisse zeigte sich, dass eine Einteilung in verschiedenen Biersorten (Pils, Alt, Export, Weizen, etc.) nicht möglich war, wodurch der Versuch einer Klassenbildung hier noch scheiterte. Es zeigte sich

jedoch, dass die Ausreißer durch Weizenbiere verursacht werden. Zur Überprüfung wurde bei der Korrelationsrechnung zwischen Weizenbieren und Bieren mit einem niedrigeren CO<sub>2</sub>-Gehalt unterschieden.

Grundsätzlicher Unterschied zwischen Weizenbieren (obergärig) und den anderen (unter- und obergärigen) Bieren ist in erster Linie die Verwendung einer anderen Rohstoffkomponente und der höherer CO<sub>2</sub>-Gehalt.

Rohstoffseitig kann von einer anderen Proteinzusammensetzung im fertigen Bier ausgegangen werden. Als problematischer erwies sich der hohe CO<sub>2</sub>-Gehalt (> 7 g/l) des Bieres, welcher zu gravierenden Messfehlern führte.

Die isolierte Betrachtung der Biere mit einem Kohlendioxidgehalt von ca. 5 g/l zeigt eine deutlich verbesserte Korrelation der beiden Werte.



**Abb. 5.16.: Korrelation zwischen Ross & Clark und Half Life-Time Lg-Foamtester (CO<sub>2</sub>-Gehalt ~ 5 g/l)  
(n = 259 Wertepaare,  $\alpha = 0,1$  (\*\*\*))**

Wie in Abb. 5.16. zu sehen ist führt die Klassenbildung in Biere mit einem CO<sub>2</sub>-Gehalt von:

- ca. 5 g/l
- > 6,5 g/l

zu einer Korrelationsverbesserung in der ersten der beiden Klassen. Die Ausreißer sind ausschließlich höher karbonisierte Biere.

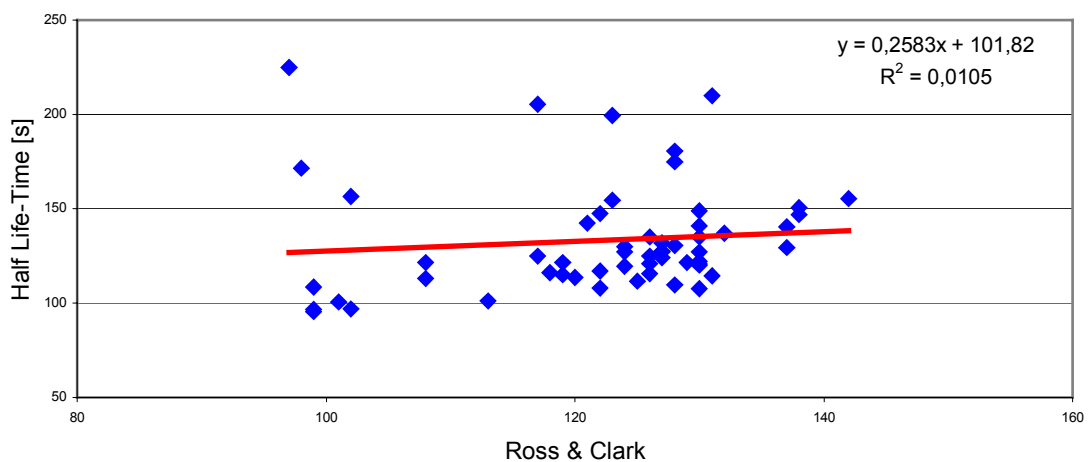
Die Ursachen der Ausreißer bei der Gesamtbetrachtung sind in der Verbindung des bierspezifischen hohen Gehaltes an gelöstem Gas und den apparativen Vorgaben Treibgasdruck und Messkammervolumen zu sehen.

Der Treibgasdruck von 2,5 bar liegt unterhalb des Sättigungsdrucks der Biere. Dies führte zur Bildung von Gasblasen im Verbindungsschlauch zwischen Ansticheinrichtung und Messkammer. Es ist ein Treibgasdruck von 4 bar zu verwenden.

Das Messkammervolumen von 600 ml erwies sich als zu klein. Durch den hohen Sättigungsdruck in Verbindung mit dem Hochscherprozess in der Düse wurden große Schaumvolumina gebildet. Diese überschritten Volumen von ca. 600 ml, das überschüssige Schaumvolumen trat aus dem Geräteüberlauf aus.

Eine Quantifizierung der im Schlauch durch Gas verdrängten und abgelaufenen Biermenge war nicht möglich.

Die isolierte Betrachtung der hochkarbonisierten Biere zeigt ein anderes Bild. Die Korrelation nimmt ab, beide Messverfahren sind nicht mehr miteinander vergleichbar. Durch die Bierverluste wird die Zeit bis zur Rückbildung der erforderlichen Biermenge von 123 ml länger, da das vorhandene Schaumvolumen nicht ausreicht, in die geforderte Biermenge innerhalb eines vergleichbaren Zeitraums zu zerfallen.



**Abb. 5.17.: Korrelation zwischen Ross & Clark und Lg-Foamtester, Weizenbiere**  
(n = 56 Wertepaare,  $\alpha > 5 \%$ )

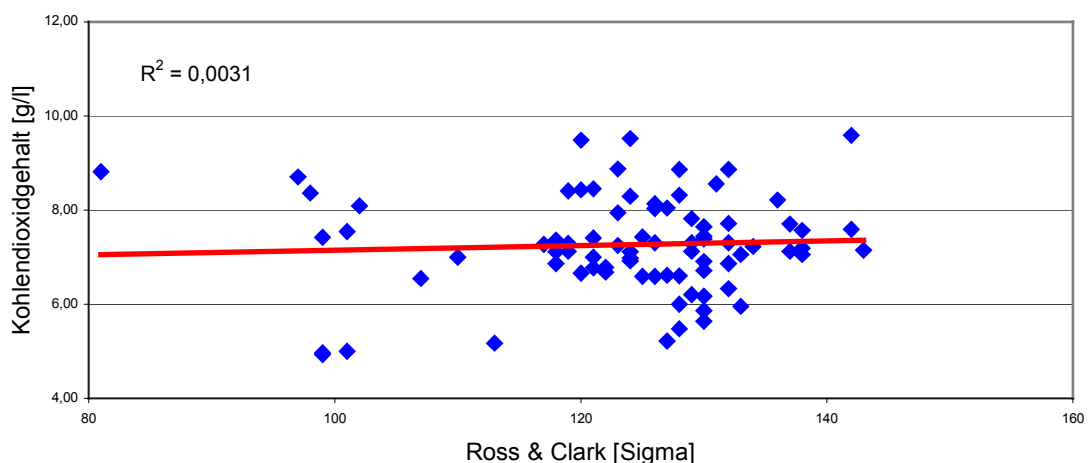
Die statischen Grenzwerte der zu erreichenden Biermenge bis zum Abschluß der Messung sowie die apparativen Vorgaben zeigten, dass das Gerät für die Messung hochcarbonisierter Biere nicht geeignet war.

Als Konsequenz der Beobachtungen wurde das Volumen der Messkammer provisorisch von 600 auf 800 ml erweitert, der Treibgasdruck auf 4 bar erhöht. Diese Maßnahmen machten es möglich, Weizenbiere ohne Verluste der Biermenge zu messen und vergleichend mit beiden Methoden weiter zu arbeiten.

Bei nochmaliger Messung traten die angesprochenen Bierverluste nicht mehr auf, die Korrelation verbesserte sich deutlich.

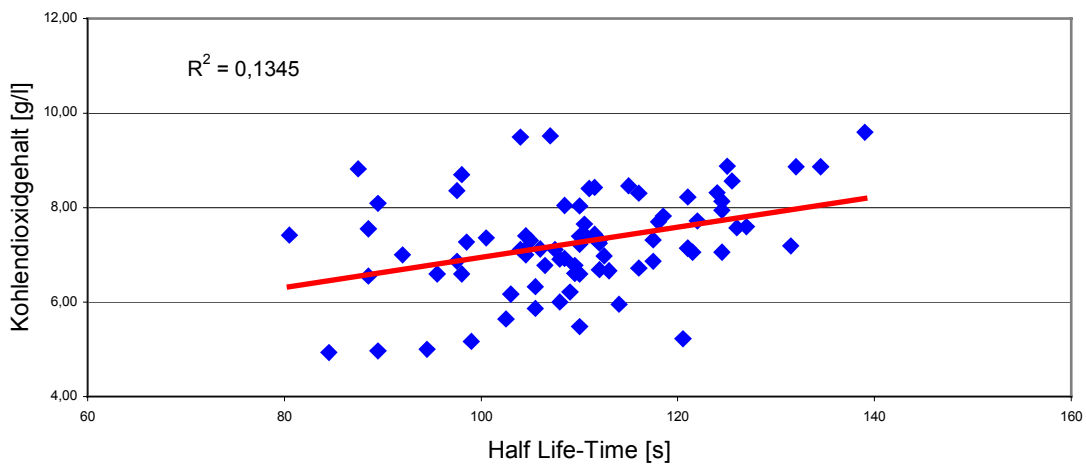
Die erreichte Korrelation zwischen den Messergebnissen des Lg-Foamtesters und den Werten nach Ross & Clark führte zur Einführung des Gerätes als Standardmessgerät bei den DLG-Untersuchungen ab dem Jahr 2002. Da die Richtlinien eine Untergrenze für die Schaumstabilität vorschreiben, wurde eine Messung nach Ross & Clark im Zweifelsfall vorgeschrieben.

Bei der Messmethode nach Ross & Clark ist der CO<sub>2</sub>-Gehalt des Bieres nur in sehr geringem Maß mit der Schaumhaltbarkeit in Verbindung zu bringen. Bei einem Probenumfang von 80 Wertepaaren ist keine Korrelation nachweisbar.



**Abb. 5.18.: Korrelation von Schaumstabilität (Ross & Clark) und CO<sub>2</sub>-Gehalt (n = 80 Wertepaare,  $\alpha > 5 \%$ )**

Die Verbindung zwischen Lg-Foamtestermesswert (Half Life-Time) und CO<sub>2</sub>-Gehalt ist deutlich signifikanter.



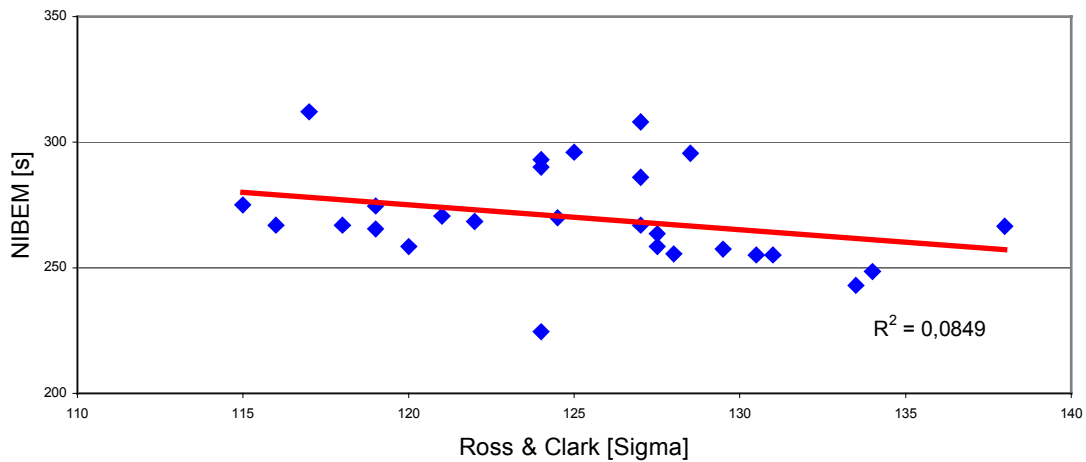
**Abb. 5.19.: Korrelation von Schaumstabilität (Lg-Foamtester) und CO<sub>2</sub>-Gehalt (n = 80 Wertepaare,  $\alpha = 0,1$  % (\*\*\*))**

Daher ist die Schauminduktion mit biereigener CO<sub>2</sub> im Hinblick auf die Widerspiegelung realer Verhältnisse, besser geeignet als die Verwendung bierfremden Gases.

### 5.2.2. NIBEM-Apparat im Vergleich zur Schaummessung nach Ross & Clark

Die beiden Systeme sind bereits öfter verglichen worden /42/. Die schlechtere Reproduzierbarkeit der NIBEM-Werte ist immer wieder Diskussionsgegenstand. Da während der laufenden Untersuchungen eine neue Ausbaustufe des NIBEM-Apparates ausgeliefert wurde, sollte dieser im Hinblick auf mögliche Verbesserungen der Korrelation zwischen beiden Schaumanalysen untersucht werden. Die Verbesserung der neuen Baureihe des NIBEM-Apparates liegt im Einbau einer programmierbaren Temperaturkompensation.

Dies beinhaltet zwar zuerst einen höheren Arbeitsaufwand, ist jedoch hinsichtlich der Ergebnisse als vorteilhaft zu bezeichnen, da eine betriebspezifische Abstimmung der Faktoren möglich ist. Abweichungen, die sich durch eine Programmierung durch den Hersteller ergeben würden, sind ausgeschlossen.

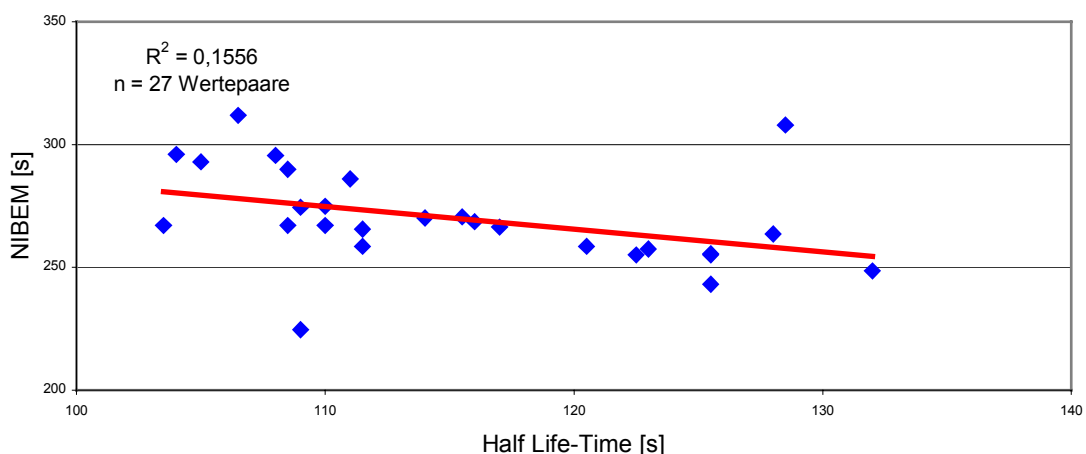


**Abb. 5.20.: Korrelation zwischen Ross & Clark und NIBEM-Methode**  
(n = 27 Wertepaare,  $\alpha > 5 \%$ )

Durch diese Überprüfung konnten jedoch die bisherigen Ergebnisse bestätigt werden. Der Korrelationskoeffizient von 0,2914 sowie die Irrtumswahrscheinlichkeit zeigt die unzureichende Vergleichbarkeit beider Analysenwege.

### 5.2.3. NIBEM-Apparat im Vergleich zum Lg-Foamtester

Der Kreuzvergleich zwischen beiden Messsystemen lässt erwarten, dass die Vergleichbarkeit dieser beiden Systeme nicht gegeben ist. Als untersuchter Stichprobenumfang wurden die gleichen Biere herangezogen wie bei dem NIBEM-Apparat und bei der Ross & Clark-Methode.



**Abb. 5.21.: Korrelation zwischen Half Life-Time Lg-Foamtester und NIBEM-Methode**  
(n = 27 Wertepaare,  $\alpha > 5 \%$ )

Die Annahme des Kreuzvergleichs wird bestätigt. Insgesamt kann ein verwertbarer mathematischer Zusammenhang der Zahlenwerte nur zwischen Ross & Clark und dem Lg-Foamtester hergestellt werden.

Die Modifikationen am NIBEM-Apparat haben zu keiner signifikanten Verbesserung der Vergleichbarkeit zu anderen Analysenmethoden geführt.

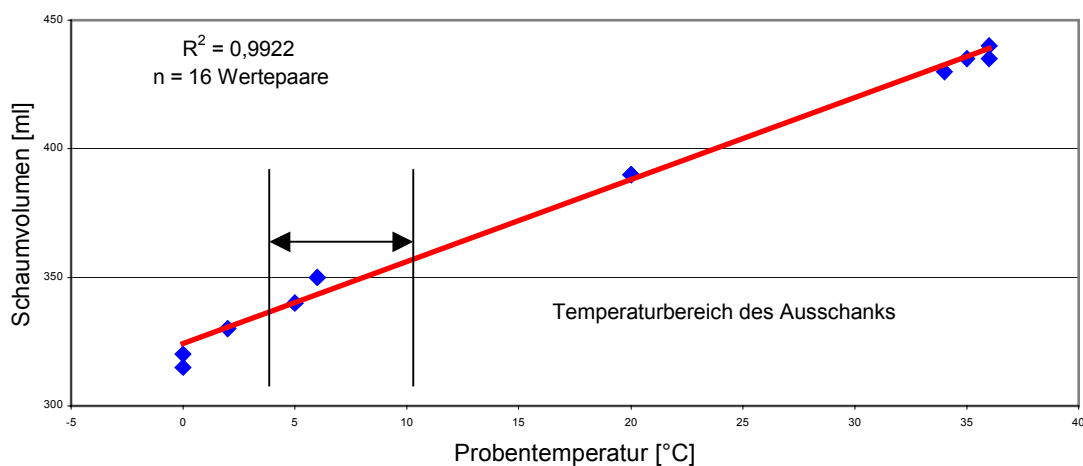
### 5.3. Überprüfung der Genauigkeit der Temperaturkompensation

Wie in Kap. 4.2.1. erwähnt besitzt der Lg-Foamtester eine Temperaturkompensation. Diese soll alle beschriebenen fluiddynamischen temperaturbedingten Veränderungen der Parameter ausgleichen. Es erfolgte eine Untersuchung der Zuverlässigkeit dieser Funktion.

#### 5.3.1. Probentemperatur und Schaumvolumen

Die Proben wurden auf folgende Temperaturen eingestellt: 0, 5, 20 und 35 °C, die Spülwassertemperatur wurde mit 13 °C (Temperatur des Leitungswassers) konstant gehalten. Zur Feststellung wurde weit über die technologisch relevanten Grenzen hinausgegangen, um den Ausschnitt der Beobachtungen weiter zu fassen.

Der Einfluss auf die Messergebnisse zeigt sich in den folgenden Abbildungen:



**Abb. 5.22.: Einfluss der Probentemperatur auf das gebildete Schaumvolumen (n = 16 Wertepaare,  $\alpha = 0,1$  % (\*\*\*))**

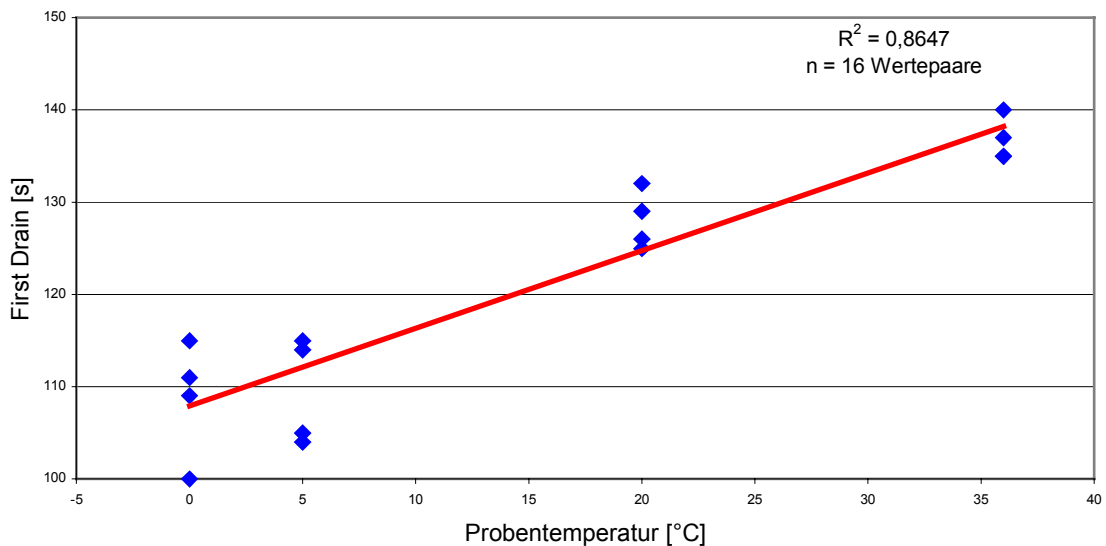
Es lässt sich feststellen, dass das Schaumvolumen mit steigender Temperatur trotz des Einsatzes der Temperaturkompensation größer wird. Die Größe der sich bildenden Gasblasen ist abhängig von den Gesetzen nach Henry und Dalton. Eine

niedrige Temperatur führt zu einem geringen Volumenanteil von Gas im Bierschaum. Zur Feststellung wurde ein Bier nach „Porter“-Brauart herangezogen.

### 5.3.2. Probentemperatur und First Drain

Die Unterschiede beim Schaumvolumen aufgrund einer veränderten Temperatur zeigen, dass die erzeugten Schäume sich qualitativ unterscheiden. Verschobene volumetrische Verhältnisse von Flüssigkeits- und Gasphase sowie differierende Schaumtemperaturen lassen vermuten, dass der Schaumzerfall unterschiedlich verlaufen wird.

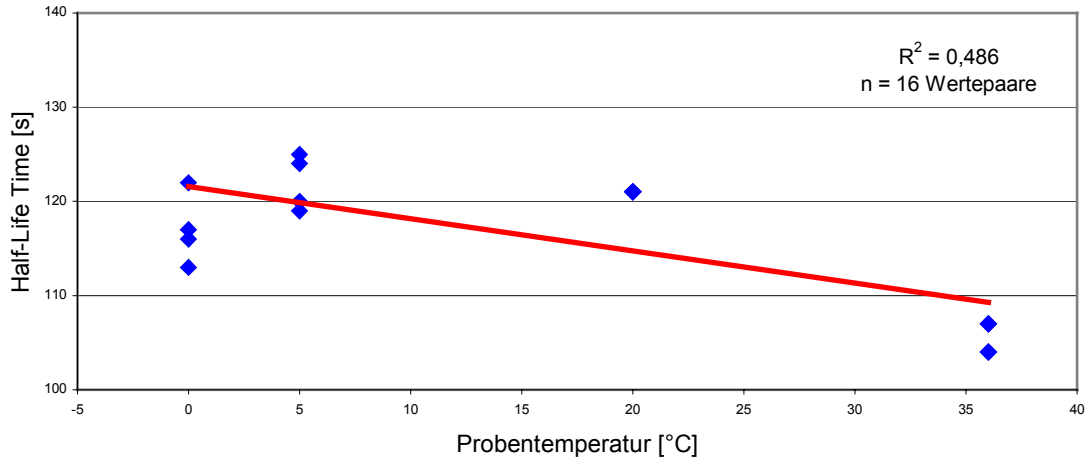
In der ersten Phase des Schaumzerfalls zeigt sich ebenfalls eine eindeutige Temperaturabhängigkeit der Messwerte. Die Drainage des Schaums verläuft langsamer bei höheren Temperaturen.



**Abb. 5.23.: First Drain in Abhängigkeit von der Temperatur**  
(n = 16 Wertepaare,  $\alpha = 0,1 \%$  (\*\*\*))

### 5.3.3. Probentemperatur und Half Life-Time

Innerhalb des nächsten Abschnittes des Schaumzerfalls – weitere 25 % der Gesamtmenge – ergibt sich eine andere Aussage:



**Abb. 5.24.: Half Life-Time in Abhängigkeit von der Temperatur**  
( $n = 16$  Wertepaare,  $\alpha = 0,27 \%$  (\*\*))

Durch die erhöhte Temperatur der Probe wird der Schaumzerfall in diesem Abschnitt schneller. Dies ist eine Bestätigung der in der Literatur beschriebenen Vorgänge.

Die Temperaturkompensation ist, wie an den Ergebnissen zu ersehen ist, prinzipiell nicht in der Lage einen konstanten Messwert zu liefern. Auf die Temperierung der Probe kann nicht verzichtet werden. Eine Standardisierung der Probentemperatur und damit auch Determinierung der Eigenschaften von Bier zu Bier kann nur durchgeführt werden, wenn gleiche Ausgangsbedingungen vorliegen.

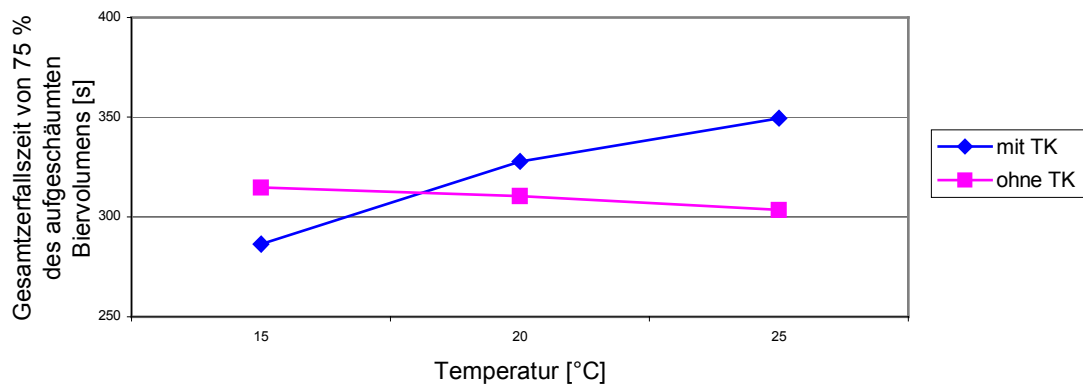
Es ist ferner zu bemerken, dass sich der Pt 100 sehr langsam auf die Probentemperatur einstellt. Zu Beginn der Messung zeigt das Gerät die Spülwassertemperatur an. Mit Beginn des Aufschäumens passt sich diese an, wobei die wirkliche Temperatur der Probe erst am Ende des Aufschäumens angezeigt wird.

Die ständige Frequenzmodulation, welche dem gerade angezeigten Temperaturmesswert folgt, stellt eine Fehlerquelle dar, weil nicht die wirkliche Probentemperatur der Volumen Anpassung zugrunde liegt, sondern ein Gradient, der sich der Probentemperatur annähert. Das Einschwingverhalten des Pt 100 ist deutlich zu träge.

Überlegungen hinsichtlich der exakten Dosierung der Biermenge von 164 ml wurden im späteren Verlauf der Arbeit angestellt. Bis dahin wurde auf das bestehende System der zeitgesteuerten Dosierung weiter genutzt, jedoch wurde die Temperaturkompensation deaktiviert.

Die unbefriedigende Arbeitsweise der Temperaturkompensation führte zum Entschluss zu überprüfen, bei welcher Temperatur des Probenbieres überhaupt gleiche Werte – mit und ohne Temperaturkompensation – gemessen werden.

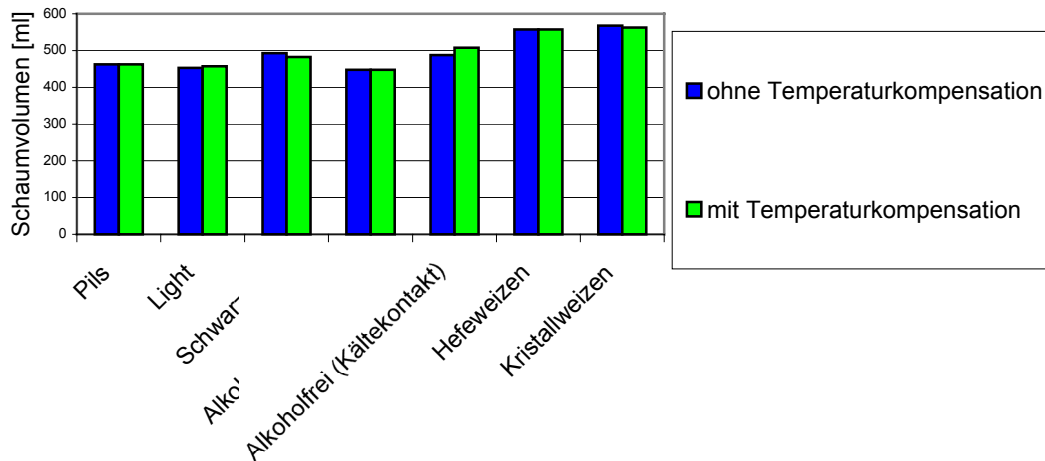
Ein Bier wurde auf die Eckpunkte der in der Betriebsanleitung vorgegebenen Spanne von  $20 \pm 5$  °C temperiert. Diese Proben wurden jeweils mit und ohne eingeschaltete Temperaturkompensation gemessen.



**Abb. 5.25.: Zerfallszeiten von 75 % des aufgeschäumten Biervolumens mit und ohne Temperaturkompensation**

Eine Reduzierung der Temperaturabhängigkeit des Bierschaumzerfalls auf eine Viskositätsveränderung erweist sich als eine zu starke Vereinfachung der Vorgänge. Durch den Schnittpunkt der beiden Kurven ergab eine Fokussierung der Temperaturkompensation auf ca. 18 °C.

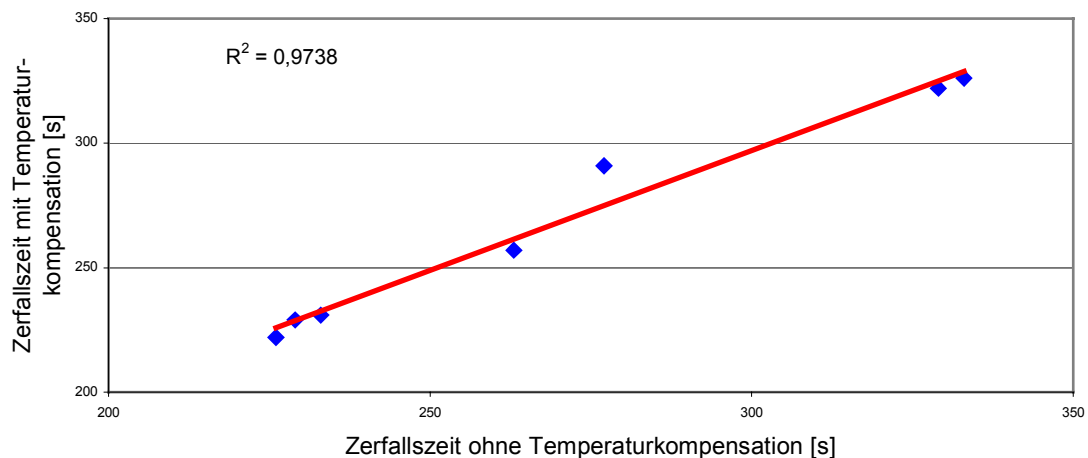
Die Überprüfung des ermittelten Arbeitspunktes wurde mit 7 Bieren durchgeführt, wobei jeweils mit und ohne Temperaturkompensation 10 Messungen des Schaumvolumens erfolgten.



**Abb. 5.26.: Schaumvolumen mit /ohne Temperaturkompensation bei 18 °C**

Es wurde weiter untersucht, ob der gefundene Arbeitspunkt der Temperaturkompensation (Abb. 5.25.) von 18 °C einen bierspezifischen Wert darstellt oder ob er generell für alle Messungen mit diesem Gerät vorliegt.

Die Gegenüberstellung der Zerfallszeiten stützt diese These, weil von der normalen Reproduzierbarkeit abgesehen annähernd gleiche Werte erzielt werden.



**Abb. 5.27.: Verifizierung der dosierten Menge über die Zerfallszeiten (n = 8 Wertepaare,  $\alpha = 0,1 \%$ , (\*\*\*))**

Die Funktionsweise der Temperaturkompensation wird hier deutlich. Die First Drain-Zeit verlängert sich durch eine verzögerte Drainage, die Half Life-Time wird kürzer. Verglichen mit der Messung des Einflusses steigender Proben Temperaturen bei unkompensierter Messung (Kap. 6.1.1.) zeigt sich, dass beide addierte

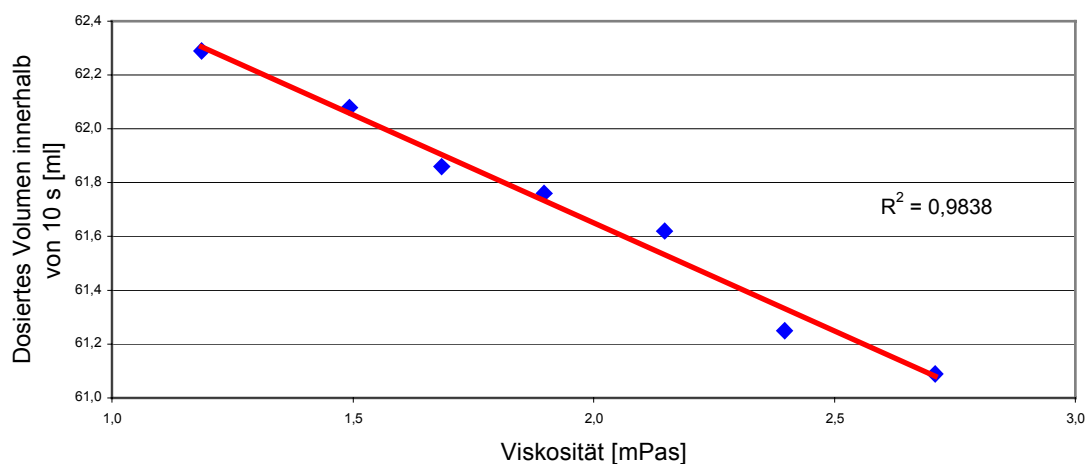
Zerfallszeiten kürzer werden. Die Verlängerung der Drainagezeiten kann durch die Verkürzung der Halbwertszeit nicht ausgeglichen werden.

#### 5.4. Untersuchungen des Einflusses des Viskositätsverhaltens auf die fluiddynamischen Vorgänge in der Düse

Die Annahme der unterschiedlichen Dosierung bei verschiedenen Viskositäten wurde untersucht. Hierzu wurde Ethylenglycol einer Modelllösung aus dest. Wasser + 5 Vol.-% Ethanol zugesetzt bis entsprechende Viskositäten erreicht wurden.

Die Dosierzeit wurde auf 10 s eingestellt. Das Flüssigkeitsvolumen wurde in ein austariertes Becherglas eingeleitet. Durch Auswiegen des Becherglases und Berücksichtigung der Dichte wurde das Flüssigkeitsvolumen bestimmt.

Es wurden jeweils 10 Messungen durchgeführt, die Modelllösung wurde auf eine Temperatur von 20 °C eingestellt.



**Abb. 5.28.: Dosierung in Abhängigkeit von der Viskosität**  
(n = 7 Wertepaare,  $\alpha = 0,1 \%$  (\*\*\*))

Eine Umrechnung der bei 10 s ermittelten Werte auf 26,4 s ergab folgende dosierte Flüssigkeitsmenge:

**Tab. 5.3.: Tatsächlich dosiertes Volumen innerhalb der eingestellten Dosierzeit**

| Viskosität [mPas] | Dosierzeit [s] |           |
|-------------------|----------------|-----------|
|                   | 10,0           | 26,4      |
| 1,1863            | 62,29 ml       | 164,45 ml |
| 1,4932            | 62,08 ml       | 163,89 ml |
| 1,6841            | 61,86 ml       | 163,31 ml |
| 1,8970            | 61,76 ml       | 163,05 ml |
| 2,1472            | 61,62 ml       | 162,76 ml |
| 2,3963            | 61,25 ml       | 161,70 ml |
| 2,7082            | 61,09 ml       | 161,28 ml |

Bei Betrachtung der Werte zeigt, dass sich hier eine Differenz zwischen niedrigstem und höchstem Wert von 3,17 ml bei 20 °C ergibt. Eine Abhängigkeit der Strömungsvorgänge in der Düse vom Viskositätsverhalten wird deutlich. Biere mit sehr hoher Dichte zeigen häufig eine erhöhte Viskosität, so dass es zu einer Überlagerung der beiden Effekte kommt. Die Verfälschung wegen einer Minderdosierung mündet in einer Veränderung des fundamentalen Messprinzips der gleichen Biermenge. Die unzureichende Menge führt wiederum zu einer Verfälschung des Messergebnisses.

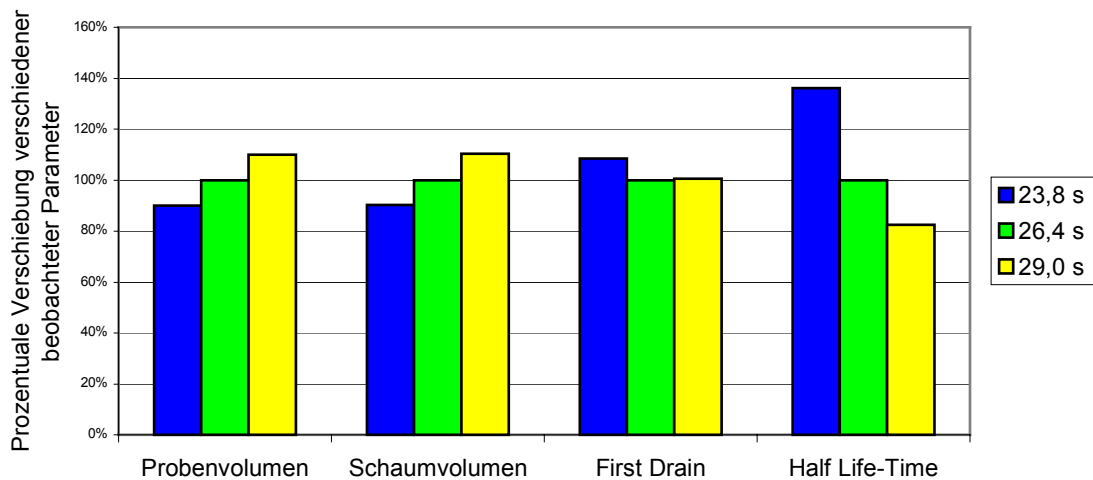
Die Ergebnisse stellen den Kalibriervorgang in Frage, da das „Standardbier“ Pilsener Brauart ist. Bei anderen Viskositäts- bzw. Stammwürzestufen sind Abweichungen zwangsläufig und der Kalibriereffekt ist in Frage gestellt.

### **5.5 Überlagerte Einflüsse durch Temperaturkompensation und Viskositätsverhalten der Probe**

Die Viskosität der Probe wie auch die Temperaturkompensation wirken sich auf die dosierte Menge aus. Dies hat die gleichen Folgen für die Messwertermittlung wie das beschriebene Überlaufen von Probenvolumen beim Aufschäumen hochcarbonisierter Biere. Die scharfe Trennung der Lichtschränken in Transmission bzw. Reflektion führt dazu, dass bei sehr weitem Fortschreiten der Flüssigkeitsrückbildung, d. h. sehr trockenem Schaum, die Schaltung sich verzögern kann, da nur eine geringe Menge Flüssigkeit fehlt.

Dieses Phänomen begründete die schlechte Korrelation zwischen Ross & Clark und dem Lg-Foamtester bei Weizenbieren innerhalb der einführenden Untersuchungen.

Um den Einfluss fehlender Biermenge genauer quantifizieren zu können wurde die Dosierzeit ohne Temperaturkompensation jeweils um 10 % ausgehend von 26,4 s geändert.



**Abb. 5.29.: Relative Veränderung der zu messenden Parameter**

Während sich Proben- und Schaumvolumen linear zur geänderten Dosierzeit verhalten ist bei First Drain und Half Life-Time durch die zehnprozentige Veränderung des Biervolumens eine deutliche Verschiebung der Messwerte zu sehen.

Erneut zeigen sich die Auswirkungen einer ungenauen Volumendosierung.

## 5.6. Zusammenfassende Bewertung

Insgesamt kann ein Zusammenhang der Zahlenwerte nur zwischen Ross & Clark und Lg-Foamtester hergestellt werden. Grundsätzlich wird klar, dass eine weiterführende Untersuchung im Hinblick auf eine Isolierung der Gerätes gegen relevante Umgebungsbedingungen sinnvoll ist.

Die aufgezeigten Probleme der Funktionsweise und die vereinfachte Betrachtung der Verhältnisse bei verschiedenen Bieren zeigt, dass einige grundlegende Gerätefunktionen überprüft und gegebenenfalls an die unterschiedlichen Bedingungen angepasst werden müssen.

Die Veränderung des Probenvolumens zur Sicherstellung gleicher Messwerte innerhalb eines Bieres mit unterschiedlichen Temperaturen ist abzulehnen. Sollte eine Kompensation der Probertemperatur wirklich durchgeführt werden, so wäre die Bestimmung verschiedener Parameter (z.B. Viskositätsverhalten bei verschiedenen

Temperaturstufen) erforderlich. Wie in Kap. 5.1.2.1. gezeigt wurde, wirken sich Temperaturunterschiede nicht nur auf das Viskositätsverhalten aus. Andere Parameter wie Oberflächenspannung, Dichte und Sättigungsdruck betrifft dies ebenso. Die folgende Tabelle verdeutlicht die Abhängigkeiten:

**Tab. 5.4.: Matrix der Einflussfaktoren**

|                     | t > 20 °C | t < 20 °C | Dosierung<br>> 20 °C |      | Dosierung<br>< 20 °C |      |
|---------------------|-----------|-----------|----------------------|------|----------------------|------|
|                     |           |           | Vol.                 | Gew. | Vol.                 | Gew. |
| Dichte              | ↓         | ↑         | =                    | -    | =                    | +    |
| Viskosität          | ↓         | ↑         | +                    | +    | -                    | -    |
| Sättigungsdruck     | ↑         | ↓         |                      |      |                      |      |
| Oberflächenspannung | ↓         | ↑         | -                    | +    | +                    | -    |

wobei:

↑ : erhöhende Wirkung

↓ : verringernde Wirkung

+: steigendes dosierte (s) Biermasse / -volumen

- : verringertes dosierte (s) Biermasse /-volumen

= : ohne Veränderung auf die/das dosierte Biermasse /- volumen

Untersuchungen im Vorfeld wären für jedes Bier erforderlich, die Schaffung eines generellen Korrekturfaktors führt zu keinen befriedigenden Ergebnissen.

## **5.7 Diskussion der Ergebnisse**

### **5.7.1. Fluiddynamische Kennwerte und milieubedingte Veränderungen**

#### **5.7.1.1. Dichte**

Die Untersuchungen der Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur zeigen ein konformes Verhalten beider untersuchter Biere. Die Koeffizienten der beiden exponentiellen Funktionen unterscheiden sich nur im Absolutglied.

Die vermutete Anomalie des Wassers, welche auch beim Bier (~ 92 % Wassergehalt) auftreten sollte, konnte mit den zur Verfügung stehenden Untersuchungsmethoden nicht nachgewiesen werden.

Die Auswirkungen, welche sich jedoch auf der abweichenden Dosierung bei der Kalibrierung des Systems über das Gewicht eines Standardbieres ergeben, werden klar. Eine genaue Quantifizierung des Fehlers ist jedoch nicht möglich, da die

Dichte- und Viskositätsunterschiede zwischen dem Kalibrierstandard und der jeweiligen Probe unbekannt sind.

Die zu träge reagierende Temperaturkompensation trägt ebenfalls zu einer Verfälschung der dosierten Menge bei.

#### **5.7.1.2. Viskositätsverhalten und Fließaktivierungsenergie**

Bei beiden untersuchten Bieren liegt die Viskosität in einem Bereich von 0,0015 und 0,0035 Pas (20 bis 0 °C). Die Änderungen liegen prozentual bei mehr als 100%.

Absolut beträgt die Änderung lediglich 0,0020 Pas, was als eine eher geringe Abweichung angesehen werden kann.

Die Betrachtung der Fließaktivierungsenergie zeigt, dass diese bei Bier ca. 50 bis 60 % höher liegt als bei Wasser. Die Erhöhung ist durch den Gehalt an hochmolekularen Substanzen gekennzeichnet. Kolbach /99/ bezeichnet diese Stoffe als Dextrine. Dieser Begriff ist deutlich zu speziell, eine Bezeichnung als Restextrakt wäre unspezifischer und zutreffender. Unabhängig von der Nomenklatur zeigt Kolbach, dass der Restextrakt die größte viskositätserhöhende Wirkung hat. Ethanol erhöht seiner Meinung nach ebenfalls die Viskosität des Bieres.

Die Veränderung des Viskositätsverhaltens bei unterschiedlichen Temperaturen war die Grundlage für den Einbau einer Temperaturkompensation.

#### **5.7.2. Vergleich der Methoden der Schaummessung**

Die einführenden Untersuchungen zeigten, dass die Korrelation zwischen Ross & Clark als Referenzmethode und die Messwerte nach Lg-Foamtester nur bei bestimmten Biersorten eine gute Korrelation (\*\*\*-Signifikanz) zeigten.

Wie in Abb. 5.17. zu sehen ist, ist die Korrelation bei hochcarbonisierten Bieren unbefriedigend.

Prinzipiell ist die Aussage zutreffend, dass das Gerät in der ursprünglichen Konfiguration für solche Biere nicht geeignet ist. Die Auslegung aller Gerätebaugruppen ist auf 2,5 bar erfolgt. Vor dem Hintergrund der Entwicklung des Systems in den Carlsberg-Laboratorien, Kopenhagen (DK), ist dies verständlich, da die Brauerei selbst keine Biere mit einem so hohen CO<sub>2</sub>-Gehalt produziert.

Daher kommt der Einsatz in Mitteleuropa – Deutschland und Belgien als Produzenten hochcarbonisierter Biere und gleichzeitig Länder mit dem größten Gesamtausstoß in Europa – als Vermarktungsgebiet für den Lg-Foamtester nur bedingt in Betracht.

Lediglich die innerbetriebliche Analytik kann als Vermarktungschance angesehen werden. Als Referenzmethode kann das Gerät nicht eingesetzt werden, da die erwähnte Entbindung von CO<sub>2</sub> in den verschiedenen Geräteteilen nicht reproduzierbar ist. Ein weiterer Nachteil ist das zu klein bemessene Zylindervolumen. Die Verwendung als Referenzgerät ist jedoch angestrebt. In Brauereien mit hochcarbonisierten Bieren im Produktportfolio kommt das Gerät nicht in Betracht.

Der Bereich der innerbetrieblichen Analytik ist durch das NIBEM-Gerät bereits abgedeckt, dessen Bedienung ist ebenfalls einfach und personalexintensiv. Es besteht somit für die Anwender kein Grund zu einem Systemwechsel, da kein Preisvorteil besteht und zunächst neue Referenzwerte erarbeitet werden müssten.

Vor dem Hintergrund der schlechten Vergleichbarkeit der NIBEM-Werte mit den Ross & Clark-Werten, macht einen Wechsel nur dann einen Sinn wenn eine vergleichbarere Analysenmethode – mit gleichem Aufwand – entwickelt werden kann. Um diese Vergleichbarkeit auf hochcarbonisierte Biere auszudehnen, wurden in der ersten Entwicklungsstufe Modifikationen durchgeführt, welche zu diesem Zeitpunkt des Projektverlaufs lediglich provisorischer Natur waren. Wie erwähnt, erfolgte kein Austausch von Baugruppen, sondern nur die Einstellung auf einen Druck von 4,0 bar und eine Zylindervergrößerung. Die Veränderungen zielten auf die Adaption an hochcarbonisierte Biere ab.

Durch die Modifikationen ist eine sofortige Verbesserung der Korrelation zu beobachten. Die Einsatzfähigkeit des Gerätes wurde somit über den gesamten Brauereibereich ausgedehnt, unabhängig von Biersorte und CO<sub>2</sub>-Gehalt kann das Gerät eingesetzt werden.

Die gezeigte gute Korrelation mit den Ross & Clark-Werten ist als Vorteil des Gerätes gegenüber dem NIBEM-Apparat zu werten, da hier der statistische Zusammenhang (auch nach der Entwicklung des NIBEM-T (Abb. 4.10.)) nicht gezeigt werden kann.

Bezüglich der Korrelation zwischen Lg-Foamtester und NIBEM-Apparat kann Gleiches ausgesagt werden.

### **5.7.3. Bewertung der Temperaturkompensationsfunktion**

Die Temperaturkompensation stellt einen großen Schritt zur Vereinfachung der Schaummessung dar. Bei den Methoden nach Ross & Clark sowie NIBEM müssen die Proben vor der Messung auf 20 °C ( $\pm 1$  °C) temperiert werden. Schnellbestimmung ist nur eingeschränkt möglich.

In der Betriebsanleitung des Lg-Foamtesters ist eine Spanne von 15 bis 25 °C angegeben, in welcher das Gerät gleiche Werte angeben soll, was die relativ präzise Temperierung der Proben für die anderen Untersuchungen überflüssig machen würde. Der Sinn des Einbaus einer Temperaturkompensation mit einem eingeschränkten Wirkungsbereich von  $\pm 5$  °C bezogen auf die Solltemperatur ist strittig, da sich in jedem Labor eine Temperiereinrichtung befindet. Der Großteil chemisch-technischer Analysen wird bei 20 °C durchgeführt, und alle Glasgeräte mit Graduierung sind auf 20 °C geeicht. Eine Temperierung von Proben in einer Glasflasche nimmt – je nach Ausgangstemperatur – ca. 20 Minuten in Anspruch.

Vor diesem Hintergrund bringt die Mehr- oder Minderdosierung von Bier über die Frequenzmodulation der Zeitzählung mehr Probleme mit sich, als ein Nutzen erreicht wird. Eine Schnellbestimmung entfällt, da die Probe in den genannten Temperaturbereich gebracht werden muss.

Die auf empirischen Untersuchungen mit einem Standardbier beruhende, von der Norm abweichende Dosierung (Kap 4.2.1.2.) kann nicht auf alle Biere übertragen werden.

Vor der Messung müsste die Viskosität des Bieres – bei der entsprechenden Probentemperatur – festgestellt werden und dem Gerät vorgegeben werden, die Dosierzeit würde entsprechend eingestellt.

Es wird deutlich, dass eine Temperaturkompensation nicht nur überflüssig ist, sondern durch die genannten Probleme Nachteile mit sich bringt.

Die Volumenmessung kann bei Beibehaltung des Analysenaufwandes z. B. durch eine induktive Durchflussmessung erreicht werden. Andere Möglichkeiten wie die Überführung der Probe in ein normiertes 164 ml fassendes Probenbehältnis, welches bei der Dosierung vollständig entleert wird, stellt eine Intensivierung des Personalbedarfs dar. Technologisch ist der mögliche CO<sub>2</sub>-Verlust der Probe zu beachten, da die Schaumbildung nur mit biereigener CO<sub>2</sub> (mit Ausnahme des Treibgases) durchgeführt wird. Deshalb sollte die Volumenmessung berührungsfrei und ohne Querschnittsänderungen der Probenzuführung erfolgen, um fluidmechanisch begründete Gasentbindung durch Druckabfall zu vermeiden.

Eine zuverlässige Arbeitsweise wäre zu erwarten, wenn Biere bei 20 °C mit und ohne eingeschaltete Temperaturkompensation gleiche Werte ermittelt würden, oder wenn bei 15, 20 und 25 °C übereinstimmende Messwerte erzielt werden. Beides ist nicht der Fall. Biere in den gleichen Temperaturstufen wurden mit und ohne Temperaturkompensation gemessen, es ergab sich durch graphische Auswertung ein Wert von 18 °C, an dem sich die Kurven schneiden. Eine Überprüfung dieses

Punktes mit auf 18 °C temperierten Proben und Spülwasser ergab Messwerte für First Drain und Half Life-Time, welche innerhalb der Wiederholbarkeit von  $\pm 2$  s lag. Es wird so deutlich, dass die Temperaturkompensation nicht auf 20 °C fokussiert ist. Die unzuverlässige Arbeitsweise und der geringe personelle und apparative Mehraufwand zur Temperierung der Proben lassen den Nutzen zweifelhaft erscheinen. Hinsichtlich einer reproduzierbaren Messung sollte auf eine Temperaturkompensation verzichtet werden.

Der Referenzcharakter von Ross & Clark, trotz aller genannter Umweltfaktoren und dem Einsatz bierfremder CO<sub>2</sub> zur Schauminduktion, deutet daraufhin, dass das Prinzip der gleichen Biermenge durch die bessere Wiedergabe des Einflusses der Biereigenschaften auf den entstehenden Schaum vorteilhaft ist. Das von Fall zu Fall unterschiedliche Probenvolumen kann keinem Messprinzip eindeutig zugeordnet werden.

Werden die beiden Extremwerte der Kompensation erreicht, ändert sich das Probenvolumen um  $\pm 14,02$  % ( $\pm 23,5$  ml). Die Ergebnisse machen deutlich, dass die Angaben von  $\pm 4,7$  ml pro °C Abweichung von 20 °C nicht den wahren Verhältnissen entsprechen.

Die Einschwingzeit des Pt 100 ist deutlich zu lang. Erst am Ende der Dosierung wird die tatsächliche Temperatur angezeigt. Die laufend angepasste Frequenzmodulation unterliegt dem Temperatureinfluss des Gerätes und der Umgebung. Unter der Voraussetzung eines sehr warmen Spülwassers und einer hohen Raumtemperatur, verbunden mit einer tiefen Probentemperatur, wird dem Gerät in der ersten Phase eine entsprechende hohe Probentemperatur suggeriert, welche durch die Verwirbelung im Bereich der Düsenmündung lange vermeintlich aufrecht erhalten wird. Der entstehende (Minder-) Dosierungsfehler muss im Zusammenhang mit einer höheren Viskosität der kalten Probe gesehen werden. In Addition wird ein falscher Messwert ausgegeben.

Insgesamt ist festzustellen, dass der Versuch der Kompensation von Temperaturunterschieden im Grundgedanken wünschenswert ist, aber temperaturabhängige Biereigenschaften und die Milieubedingungen nicht kompensiert werden können.

Die gewünschte Automatisierung der Messung verbunden mit dem Messansatz der konstanten Biermenge zeigt auf, dass ein anderer Weg als die zeitgesteuerte Dosierung gefunden werden muss. Es bietet sich die induktive Durchflußmessung an. Diese misst das Biervolumen ohne Einbauten in die Leitung und ist unabhängig von der Temperatur der Probe und anderen physikalischen Eigenschaften des

Bieres. Ziel ist es, die Schaumeigenschaften des Bieres als Summe der chemischen und physikalischen Eigenschaften festzustellen. Wenn für diesen Vorgang eine konstante Biermenge verwendet werden soll, ist die Schaffung einer gleichen Ausgangssituation wünschenswert.

#### **5.7.4. Abhängigkeiten der zu messenden Parameter des Lg-Foamtesters von anderen physikalischen Kennwerten des Bieres**

Über die Oberflächenspannung kann prinzipiell das gleiche gesagt werden, jedoch ist der statistische Zusammenhang wesentlich deutlicher. Der Einfluss ist durch die steigende Dosierung nicht-ionischer Tenside bewiesen worden.

Es kann ein direkter statistischer Zusammenhang zwischen Oberflächenspannung und Schaumstabilität aufgestellt werden. „Stoffe, die elastische Häutchen bilden können“ /100/ sind bei Übersichtsarbeiten über das Thema Schaumstabilität immer wieder angeführt. Die Proteine stehen dabei im Vordergrund, gefolgt von  $\beta$ -Glucanen und Hopfenbitterstoffen.

Die Wiederholbarkeit der Messung rückt in den Fokus der Betrachtungen. Die Messung von Bieren innerhalb einer Charge sollte die gleichen Werte ergeben, was jedoch nicht immer der Fall ist. Die Wiederholbarkeit wird in der MEBAK-Analysensammlung mit  $\pm 2$  s angegeben. Die Frage nach der Ursache der Abweichungen bei gleichem Bier und Umgebungsbedingungen kann durch eine nähere Untersuchung des Flaschenreinigungsvorganges möglicherweise beantwortet werden.

Die unterschiedliche Arbeitsweise einer Flaschenreinigungsmaschine hinsichtlich des Reinigungsmittelkontakts und der Ausspülung der Flaschen kann durch die Messung der Oberflächenspannung des verbliebenen Haftwassers am Ende der Reinigung gezeigt werden.

Hierzu wurde eine komplette Flaschenreihe einer Maschine entnommen und das Haftwasser untersucht. Die gemessenen Werte der Oberflächenspannung erstrecken sich bei 46 Flaschen über einen Bereich von 43 bis zu 63 mN/m.

Eine Untersuchung auf mögliche Unterschiede der Oberflächenspannung des Haftwassers zwischen Neuglas und Glas nach 25 Umläufen konnte nicht gefunden werden. Die Werte lagen im angegebenen Intervall.

Es ist somit möglich, dass Flaschen mit einer höheren Rest-Tensid-Konzentration einen negativen Einfluss auf den Schaum haben und als Grund für die geringfügig abweichenden Messwerte angesehen werden können. Aufgrund der geringen Restwassermenge und der damit verbundenen großen Verdünnung durch das

Getränk, ist der Einfluss aber als gering zu betrachten, für kleinere Abweichungen dennoch in Erwägung zu ziehen.

Dies gilt gerade vor dem Hintergrund, dass in der MEBAK-Analysensammlung der Half Life-Time-Wert als ausschlaggebender Messwert angegeben wird und gerade dieser von der Oberflächenspannung in stärkerem Maß beeinflusst wird.

Während die Viskosität im Verlauf des Schaumzerfalles noch weiter an Bedeutung verliert, da das Fließen von Bier durch die dünner werdenden Blasenwandungen immer mehr zum Erliegen kommt, gewinnt die Oberflächenspannung im Gegenzug mehr an Bedeutung.

Das elastische Moment bekommt im Hinblick auf die Erhaltung der Schaumblasen immer mehr Gewicht. Biere mit einer langen Half Life-Time verfügen, wegen der großen Oberflächenspannung, über eine hohe Strukturstabilität der Schaumblasen. Zufällige Störungen innerhalb des Systems „Schaumsäule“ können hierdurch besser kompensiert werden, was sich in einer besseren Schaumstabilität äußert.

Hinsichtlich der Parameter Oberflächenspannung und Viskositätsverhalten zeigen Höhn und Issing die gleichen Ergebnisse /101/. Die Schaumstabilität nach Ross & Clark zeigt keine erkennbare Abhängigkeit von den beiden Faktoren. Die Ergebnisse werden voll bestätigt.

Ein direkter Zusammenhang zwischen den Messergebnissen des Lg-Foamtesters und der Viskosität kann nicht hergestellt werden. Verantwortlich ist die Temperaturkompensation.

Zwar zeigt sich in Stadien höherer Schaumdichte eine größere Abhängigkeit, doch kann die Messung der Viskosität keinerlei Hinweis auf die zu erwartenden Ergebnisse der Schaumstabilität liefern.

Es wurde eine Untersuchung der Geräteeigenschaften im Hinblick auf die grundlegenden Gerätefunktionen wie Volumendosierung und Temperaturkompensation durchgeführt

Es zeigte sich, dass bei der ursprünglichen Konstruktion des Gerätes gemachten Vorgaben kritisch zu hinterfragen sind. Einige Punkte wurden im späteren Verlauf des Projekts geändert und den – durch die gewonnenen Ergebnisse veränderten – Erfordernissen angepasst.

## **6. Betrachtung der Einflüsse der Milieubedingungen**

Die Probleme, welche durch den Einbau einer Temperaturkompensation entstehen, sind beschrieben worden. Innerhalb der Neukonstruktion des Lg-Foamtesters wurde deshalb auf eine Temperaturkompensation komplett verzichtet, um die Milieubedingungen unbeeinflusst quantifizieren zu können.

Während aller Messungen wird das identische Biervolumen in den Messzylinder eingebracht. Der gezeigte Viskositätseinfluss bleibt jedoch für alle folgenden Messungen bestehen.

### **6.1. Umgebungseinflüsse**

Die Bestimmung der Schaumhaltbarkeit ist von vielen externen Faktoren abhängig (siehe Kap. 3.6.), die die Messungen beeinflussen können:

Die genannten Parameter sind durch den Einbau eines klimatisierten, mit Luftkonditionierung versehenem Reinraums in einem Arbeitsgang zu standardisieren. Anhand der Voruntersuchungen sind solche Investitionen nicht erforderlich und einige Parameter nicht von einschneidender Bedeutung für das Messergebnis.

Die Partikelbelastung der Luft sowie eine definierte Luftbewegung können nicht reproduzierbar dargestellt werden, da in Räumlichkeiten in denen sich Personen aufhalten durch deren Tätigkeiten immer Bewegungen der Luft stattfinden. Es müsste eine komplette Verhinderung der Sonneneinstrahlung durchgeführt werden, um Konvektion zu minimieren. Gleiches gilt für Radiatoren und ähnliche Einbauten. Der Einfluss der Luftbewegung auf die Bierschaummessung kann durch eine geschlossene Messkammer auf einen Nullwert zurückgeführt werden.

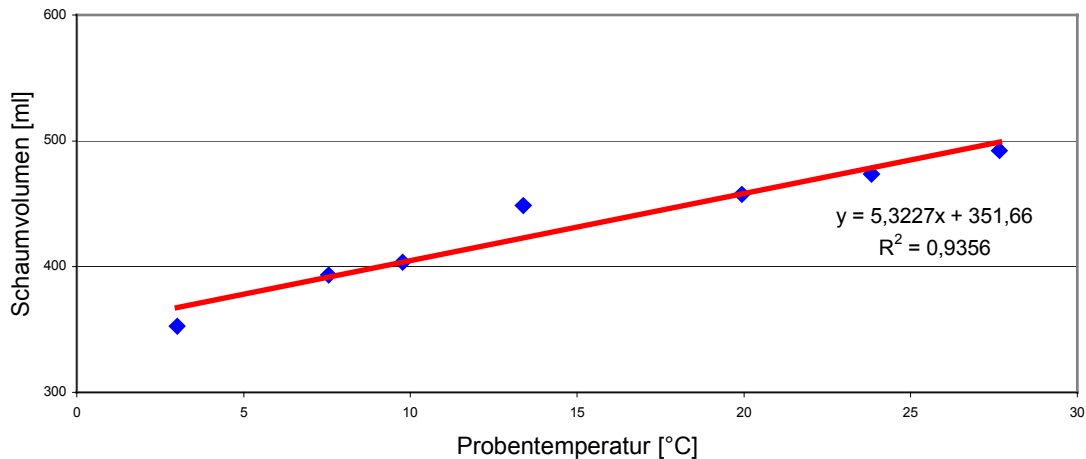
#### **6.1.1. Temperatureinfluss**

Zwischen Schaumvolumen und Proben temperatur ergibt sich eine lineare Abhängigkeit, was der folgenden Abbildung entnommen werden kann.

Die Geschwindigkeit des Schaumzerfalls gemessen als Rückbildung 2 verschiedener Flüssigkeitsvolumina ist von der Kinetik des Schaumzerfalls abhängig. Bei gleichen Biervolumina ist der Gewichtssanteil der Flüssigkeit am Schaum – bei völliger Verschäumung des Bieres – als konstant anzusehen. Auf das Volumen bezogen veränderbar ist nur der Gasanteil.

Es ergibt sich folgender mathematischer Zusammenhang in Form einer Geradengleichung:

$$y \text{ ml Schaumvolumen} = 164 \text{ ml Flüssigkeit} + x \text{ ml Gasphase} \quad \textbf{(Gleichung 6.1.)}$$



**Abb. 6.1.: Abhängigkeit Schaumvolumen von der Probentemperatur**  
**(n = 7 Wertepaare,  $\alpha = 0,7 \%$  (\*\*))**

Wie beschrieben wird das Messgerät zwischen den Messungen mit Leitungswasser gespült. Die Temperaturen des Leitungswassers zeigen jahreszeitliche Schwankungen. Im Sommer können Temperaturen von 17 °C erreicht werden, während im Winter nur 5 bis 10 °C zu messen sind.

Weiterhin ist die Lage des Wasseranschlusses im innerbetrieblichen Wassernetz zu beachten. Durchfließt das Spülwasser einen langen Leitungsweg innerhalb von Gebäuden, ist eine Erwärmung des Wasser vor dessen Einsatz zu beobachten.

Beim Spülvorgang wird das Wasser durch ein Einlaufventil am unteren Ende des Messzylinders in das Gerät eingeleitet und läuft oben ab.

Je nach Wassertemperatur wird das Gerät mehr oder minder stark abgekühlt. Innerhalb einer Spüldauer von ca. zwei Minuten nimmt das Gerät die Wassertemperatur an. Eine genaue Quantifizierung der Wärmebilanz ist wegen der vielen Materialien und der nicht genau definierten Wassermenge nicht aufzustellen. Die nach dem Spülvorgang einströmende Biermenge kühlt sich an den Geräteteilen ebenfalls ab. Das Gerät ist als regenerativer Wärmeübertrager anzusehen.

Aus der folgenden Tabelle kann ersehen werden, inwieweit Wärme von der Probe abgegeben beziehungsweise aufgenommen wird.

**Tab. 6.1.:    Eingestellte Probentemperatur und Probentemperatur nach  
beendeter Messung (Raumtemperatur ca. 25 °C)**

| Eingestellte Probentemperatur [°C] | Temperatur nach beendeter Messung [°C] |
|------------------------------------|----------------------------------------|
| 0                                  | 16                                     |
| 5                                  | 17                                     |
| 20                                 | 21                                     |
| 36                                 | 24                                     |

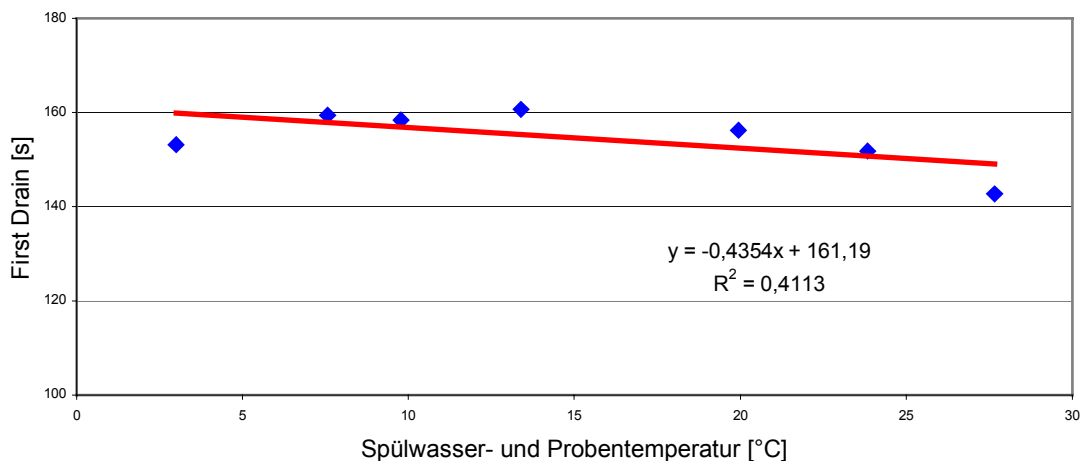
Der Tabelle ist zu entnehmen, dass sich kalte Proben während der Messung und durch den Gerätekontakt erwärmen, warme Proben sich hingegen abkühlen.

Die Problematik des Spülwassereinflusses auf die Probe stellt eine Eigenheit des Lg-Foamtesters dar, welche in dieser Form nicht auf die anderen Messmethoden übertragbar ist, da hier nur ein unwesentlicher Spülwasserkontakt stattfindet.

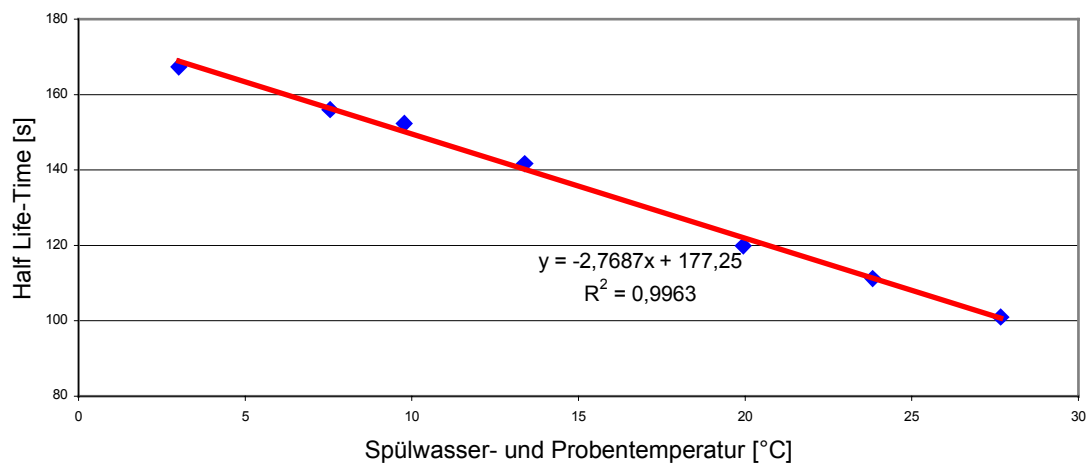
Ein weiterer Faktor der Wärmeeinwirkung der Probe ergibt sich durch die Raumtemperatur. Innerhalb der Heizperiode kann von einer Temperatur von ca. 20 °C ausgegangen werden, in anderen Jahreszeiten ist eine höhere Raumtemperatur zu vermuten. Dies führt zu einem Wärmeübergang auf die Probe.

Da der Lg-Foamtester ein geschlossenes System ist, kommt es nicht zu einem Luftaustausch oberhalb der Probe. Hier sind die beiden anderen Messmethoden wiederum anfälliger. Der Wärmeverlust der Probe über den Messzeitraum hinweg führt zu einer Stabilisierung des gebildeten Schaums.

In den folgenden beiden Abbildungen wurden Probe und Spülwasser auf eine identische Temperatur eingestellt



**Abb. 6.2.: First Drain in Abhängigkeit von der Spülwasser – und Probentemperatur**  
(n = 7 Wertepaare,  $\alpha = 5 \%$ )



**Abb. 6.3.: Half Life-Time in Abhängigkeit von der Spülwasser – und Probentemperatur**  
(n = 7 Wertepaare,  $\alpha = 0,1 \%$  (\*\*\*))

Die Werte sind als Mittelwert neun verschiedener Biere zu verstehen.

Bei Betrachtung der beiden Abbildungen wird deutlich, dass eine Temperaturerhöhung der Probe unabhängig von deren Ursache einen negativen Einfluss auf die Schaumstabilität hat.

Eine isolierte Betrachtung der beiden Zerfallszeiten zeigt, dass eine Temperaturerhöhung sich auf die First Drain-Zeit weniger stark auswirkt als auf die Half Life-Time.

Der First Drain-Wert scheint aufgrund der schlechtesten Korrelation mit der Temperatur zur Beschreibung des Schaumzerfalls ungeeignet.

Die Einzelbetrachtung der Biere und eine graphische Auswertung zeigen jedoch deutlich Unterschiede. Wird die Steigung der Trendlinie für jedes Bier als Maß für die relative Schaumverschlechterung über eine steigende Temperatur genommen zeigt sich, dass sich die Temperaturtoleranz hinsichtlich der Schaumstabilität von Bier zu Bier unterscheidet.

**Tab. 6.2.: Vergleich von relativer Schaumverschlechterung und Schaumstabilität bei 20 °C**

| <b>Bier</b>                  | <b>Steigung der Trendlinie</b> | <b>Half Life-Time [s] bei 20°C</b> |
|------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Pilsener 1                   | -2,5176                        | 129                                |
| Bock                         | -3,1458                        | 131                                |
| Light                        | -2,1030                        | 114                                |
| Alkoholfrei 1 (Dialyse)      | -2,0488                        | 113                                |
| Alkoholfrei 2 (Kältekontakt) | -2,4632                        | 125                                |
| Pilsener 2                   | -2,5835                        | 127                                |
| Schwarzbier                  | -3,4718                        | 99                                 |
| Hefeweizen                   | -3,5832                        | 125                                |
| Kristallweizen               | -3,0020                        | 119                                |

Es wird ersichtlich, dass die negative Steigung eindeutig als Maß für die Schaumeinbußen über eine steigende Temperatur angesehen werden kann. Je niedriger der Wert der Steigung, desto massiver sind die Auswirkungen einer steigenden Temperatur auf die Schaumstabilität.

Dies steht in keinem statistischen Zusammenhang mit der gemessenen Schaumstabilität bei 20 °C

Die beiden Weizenbiere sowie Bock- und Schwarzbier zeigen eine erhöhte Temperatursensibilität. Deutlich bessere Werte zeigen die alkoholarmen bzw. -freien Biere.

### **6.1.2. Umgebungsdruck**

Die Schaumerzeugung steht am Anfang einer jeden Analyse und muss deshalb reproduzierbar gestaltet werden. Die von Füllrohr /19, 20/ vorgeschlagene

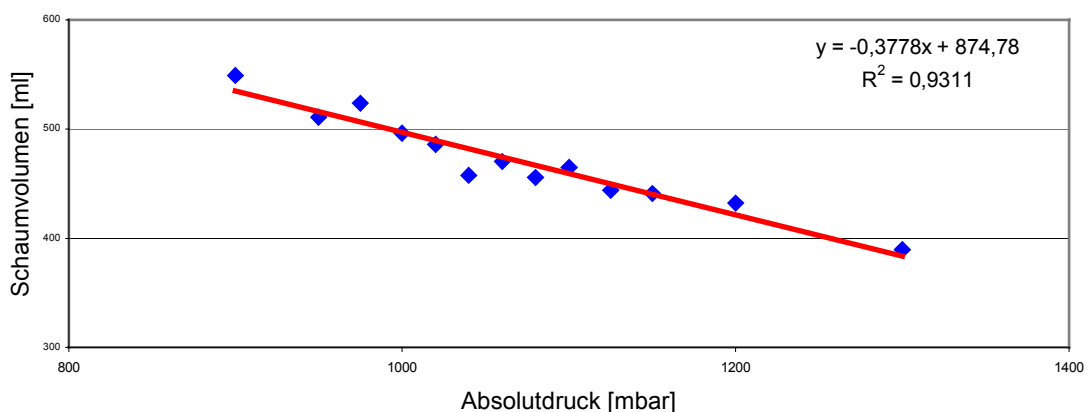
qualitative Beschreibung ist nur in diesem Fall sinnvoll, unabhängig von subjektiven Faktoren. Alle vorgestellten Systeme und Methoden erzeugen den Schaum auf unterschiedliche Weise und Qualität. Die Schaumbildung ist wie in den folgenden Abbildungen zu sehen ist, deutlich vom Umgebungsdruck abhängig, welcher in Mitteleuropa auf Meereshöhe um einen Normaldruck von 1013 mbar schwankt. Der Einfluss des Drucks auf das sich bildende Schaumvolumen aus 164 ml Bier wurden in einem Bereich von 900 bis 1300 mbar gemessen.

#### 6.1.2.1. Schaumvolumen

Der Umgebungsdruck setzt der Schaumbildung einen Widerstand entgegen. Die Beschreibung der Gesetze von Henry und Dalton zeigen, dass eine Annäherung von Umgebungsdruck und Sättigungsdruck des Bieres Auswirkungen auf die Gasentbindung hat.

Im völligen Abschluss von der Atmosphäre, wenn Umgebungsdruck und Sättigungsdruck im Gleichgewicht stehen, findet keine Gasentbindung aus dem Bier statt. Dies kann in einer verschlossenen Flasche beobachtet werden.

Die dafür durchgeführten Modifikationen des Lg-Foamtesters können dem Kapitel 8. entnommen werden.



**Abb. 6.4.: Gebildetes Schaumvolumen in Abhängigkeit vom Absolutdruck (n = 13 Wertepaare,  $\alpha = 0,1\%$  (\*\*\*))**

Es kann eine annähernd lineare Abhängigkeit zwischen Schaumvolumen und Umgebungsdruck gezeigt werden. Pro mbar nimmt das gebildete Schaumvolumen durchschnittlich um 0,3778 ml ab.

Aufgrund des Messprinzips der konstanten Biermenge ist verständlich, dass sich lediglich der Gasanteil im Schaum verändert.

Das sinkende Schaumvolumen deutet auf einen geringer werdenden Gasanteil hin. Mikroskopisch betrachtet nimmt die Blasengröße ab, die Wandstärke zu. So werden größere Kanäle gebildet, durch die die Flüssigkeit aus dem Schaum ablaufen kann. Diese Überlegung lässt den Schluss einer geringeren Schaumstabilität zu. Dem entgegen steht die Tatsache, dass durch die dickere Blasenwandung eine größere Entfernung der Schaumblasen zueinander entsteht. Dies wiederum ermöglicht zunächst die Ausbildung einer kugeligen Form der Blasen mit einer optimalen Kräfteverteilung.

Der Innendruck der Schaumblasen liegt in jedem Fall geringfügig oberhalb des Umgebungsdrucks. Je geringer das Gesamtschaumvolumen ist, desto höher der Blaseninnendruck.

Es zeigt sich, dass der geänderte Umgebungsdruck eine qualitative Veränderung des Schaums mit sich bringt. Qualitative Änderungen des Schaum bringen stets Auswirkungen auf den Zerfallsprozess mit sich.

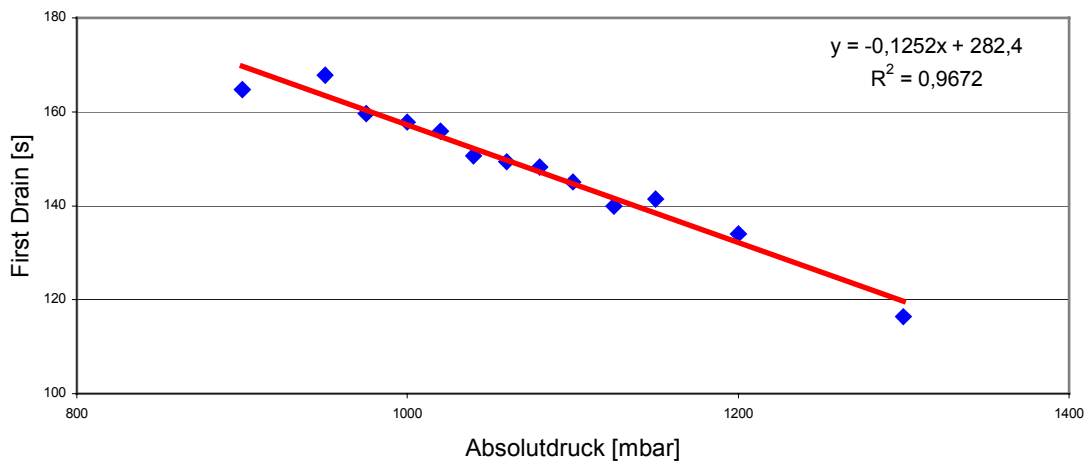
Die prozentuale Zunahme des Flüssigkeitsanteil am Bierschaum kann der folgenden Tabelle entnommen werden, die Werte wurden exemplarisch am Beispiel eines Pilsener Bieres ermittelt.

**Tab. 6.3.: Flüssigkeitsanteil am Gesamtschaumvolumen**

| Absolutdruck [mbar] | Flüssigkeitsanteil [%] |
|---------------------|------------------------|
| 900                 | 29,9                   |
| 950                 | 32,1                   |
| 975                 | 31,3                   |
| 1000                | 33,1                   |
| 1020                | 33,7                   |
| 1040                | 35,8                   |
| 1060                | 34,9                   |
| 1080                | 36,0                   |
| 1100                | 35,3                   |
| 1125                | 36,9                   |
| 1150                | 37,2                   |
| 1200                | 38,0                   |
| 1300                | 42,1                   |

### 6.1.2.2. First Drain

Ein steigender Umgebungsdruck wirkt sich auf die First Drain-Zeit wie folgt aus:



**Abb. 6.5.: Schaumdrainage mit steigendem Druck**  
(n = 13 Wertepaare,  $\alpha = 0,1 \%$  (\*\*\*))

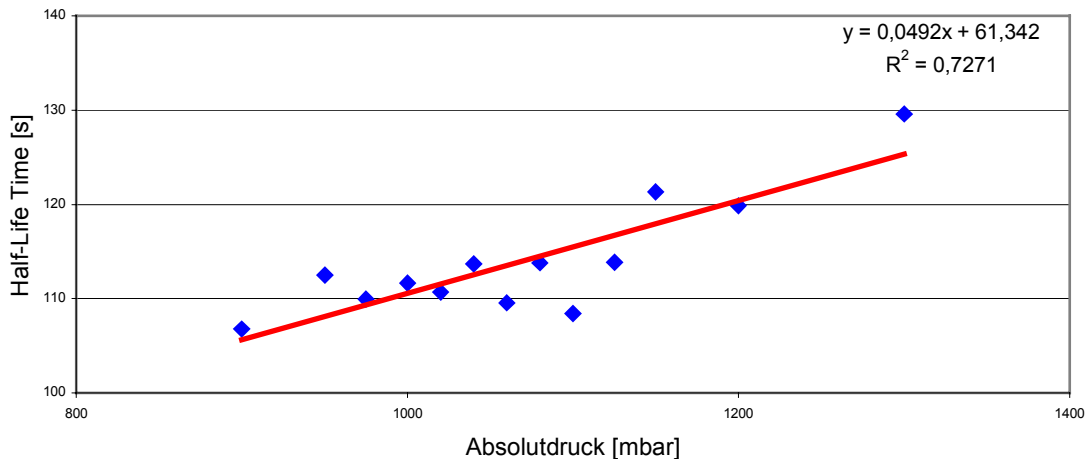
Durch steigende Flüssigkeitsanteile und die damit verbundene höher werdende Blasenwandstärke ist dem Flüssigkeitsablauf aus dem Schaum ein geringerer Widerstand entgegengesetzt. Die Viskosität, als einer der wesentlichen Einflussfaktoren auf die Drainage, spielt durch die im Querschnitt vergrößerten Kanäle eine nicht mehr so erhebliche Rolle wie bei größeren Schaumvolumina. Die Flüssigkeitsmoleküle aus den oberen Regionen der Schaumsäule legen einen verkürzten Weg zurück.

Beides trägt dazu bei, dass die First Drain-Zeit sich bei steigenden Drücken verkürzt.

Die Annahme, dass sich ein feinporiger Schaum mit kugelförmigen Blasen stabiler verhält, kann für diese erste Phase des Schaumzerfalls nicht gelten. Das genaue Gegenteil ist der Fall.

Durch den Ablauf von Flüssigkeit kommt es ebenfalls zum Abtransport oberflächenaktiver Substanzen aus dem Schaum.

### 6.1.2.3. Half Life-Time



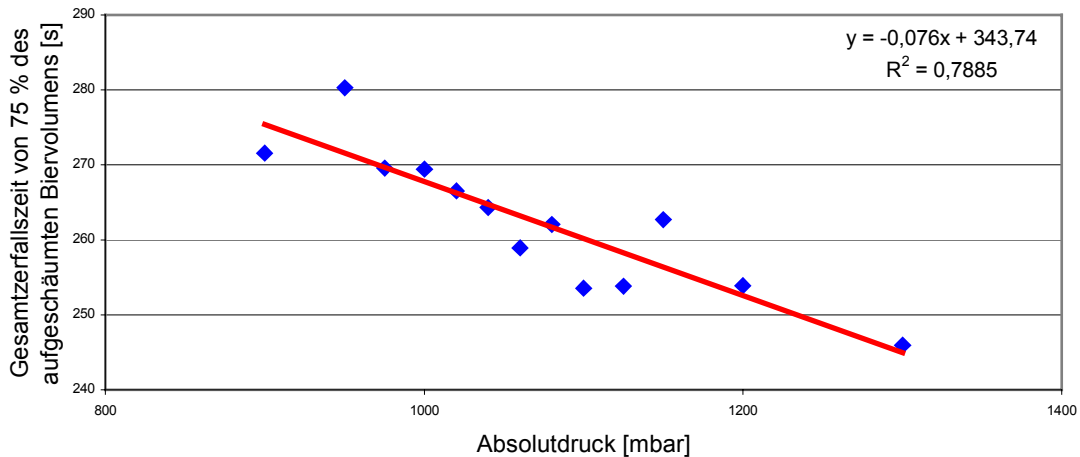
**Abb. 6.6.: Half Life-Time in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck**  
(n = 13 Wertepaare;  $\alpha = 0,1$  (\*\*\*))

Die Half Life-Time nimmt über die verschiedenen Druckstufen zu. Der Schaum wird in dieser zweiten gemessenen Phase stabiler. Da es sich bei den ermittelten Zahlenwert um den in der Analytik als Kennzahl verwendeten handelt, muss gesagt werden, dass die Schaumstabilität mit steigendem Druck ebenfalls ansteigt. Der Minimaldurchschnittswert von 107 s bei niedrigsten Druckstufe bzw. 130 s beim höchsten angelegten Umgebungsdruck bedeutet einen Anstieg der Schaumstabilität um 21,5 %.

Die beiden entgegengesetzt verlaufenden Messgrößen können addiert werden, um eine Aussage darüber zu erhalten, inwiefern sich ein steigender atmosphärischer Druck auf die Schaumstabilität bei Betrachtung der Rückbildung von 75 % des aufgeschäumten Gesamtvolumens auswirkt.

Die prozentuale Verringerung der Schaumhaltbarkeit beim First Drain liegt zwischen dessen Höchst- bzw. Tiefstwert bei 29,7 %.

Dies bedeutet mit höherer statistischer Sicherheit, dass die Schaumhaltbarkeit bei höheren Drücken und damit kleinerem Schaumvolumen abnimmt. Die Grafik der Addition beider Werte als Gesamtzerfallszeit von 75 % der Schaummenge bestätigt die Aussage.



**Abb. 6.7.: Gesamtzerfallszeit von 75 % des aufgeschäumten Biervolumens (n = 13 Wertepaare,  $\alpha = 0,1$  (\*\*\*))**

Die Stabilitätseinbußen, welche während des First Drain festgestellt werden, können durch die erhöhte Stabilität bei der Half Life-Time nur teilweise ausgeglichen werden.

Durch die Untersuchungen der Einflüsse von Umgebungsdruck und – temperatur wird es erforderlich, diese Parameter zu standardisieren. Die Messtemperatur wurde mit 20 °C (entsprechend der Standardtemperatur bei chemisch-technischen Analysen) und einem Druck von 1100 mbar absolut festgelegt. Der Druck wurde so gewählt, damit die Verhältnisse welche global als Maximaldruck der Atmosphäre auf NN gelten mit Sicherheit überschritten werden und deshalb dieser Druck unabhängig von geographischen Standort des Gerätes eingestellt werden kann. Grundsätzlich wurde ein Überdruck gewählt, da sich dieser technisch einfacher realisieren lässt.

Eine per Definition festgelegte Temperatur und ein ebenso festgelegter Druck können die Reproduzierbarkeit von Messungen an verschiedenen geographischen Orten deutlich verbessern.

### 6.1.3. Luftbewegung

Die Bewegung eines Fluids führt zu einer lokalen Druckabnahme im Bereich der Strömung. Wenn sich diese Luftbewegung in unmittelbarer Nähe des Schaums abspielt, kann von einer lokalen Druckabsenkung gesprochen werden.

Die Druckabsenkung in der Umgebung erhöht die Druckdifferenz zwischen Blaseninnendruck und Umgebung.

Die Druckabsenkung führt zu einer Oberflächenvergrößerung durch Entspannung des Gases in den Blasen. Die Entspannung bringt eine schnelle Oberflächenvergrößerung mit sich, was wiederum zu einer Zerstörung der Oberflächenstruktur führt. Eine Beschleunigung des Schaumzerfalls ist die Folge.

#### **6.1.4.       Andere Umwelteinflüsse**

Die relative Feuchte muss im Messaufbau des Lg-Foamtesters nicht untersucht werden, da der Absolutdruck, die Temperatur und die Kontaktzeit zur Wasseroberfläche weitgehend konstant sind.

Eine konstante Einstellung dieser Parameter wäre dann gegeben, wenn die Begasung des Zylinders nach dem letzten Spülvorgang mit einem technischen Gas erfolgen würde. Verglichen mit dem Effekt ist dies ein unverhältnismäßig hoher Aufwand. Weder eine Luftbewegung noch eine Partikelbelastung der Luft wäre reproduzierbar einzustellen.

Nur die offenen Verfahren wie Ross & Clark und NIBEM unterliegen einem Einfluss durch die Luftbewegung.

Wenn Partikel auf eine Schaumblase fallen, ist zu beobachten, dass Flüssigkeit in den Bereich dieses Partikels strömt, da an dieser Stelle eine Vergrößerung der Oberfläche stattfindet. Oberflächenaktive Substanzen wandern im Zuge eines Konzentrationsausgleichs an diese Stelle. Insgesamt nimmt die Konzentration dieser Stoffe ab, die Elastizität der Blasenwand oder Lamelle wird geringer, ein schnelleres Platzen ist die Folge.

Die Qualität der Partikel ist jedoch ebenfalls von ausschlaggebender Bedeutung, ölhaltige Aerosolen wirken sich negativer aus als ölfreie Stäube.

### **6.2.           Diskussion der Ergebnisse**

#### **6.2.1.       Temperatur der Umgebung**

Generell kann die Aussage getroffen werden, dass Werte von mehr als 20 °C in nicht-klimatisierten Laboratorien (in Mitteleuropa), von Ausnahmefällen abgesehen, nur in den Monaten Juni, Juli und August erreicht werden. Gegen einen bedeutenden Temperatureinfluss spricht ebenfalls die Proben temperierung vor der Analyse. Wenn diese exakt ist, sind die Kontaktmöglichkeiten, die zu einer Temperaturveränderung der Probe führen können, zeitlich und durch den Analysenaufbau begrenzt.

Eine veränderte Temperatur wirkt sich über die Viskositätsänderung direkt auf den Schaum und dessen Haltbarkeit aus, da die Drainage schneller verlaufen kann.

Hinsichtlich des Aufschäumens ist die Temperatur der Probe und der Umgebung von Bedeutung, da der Zusammenhang mit der Gasentbindung über die Gesetze von Henry und Dalton besteht.

In der Ausgangskonfiguration des Lg-Foamtesters ist die Probe bei 20 °C in den Schaumzylinder eingebracht worden. Das Gerät wurde mit Leitungswasser von 12 – 15 °C gespült. Im Winter können die Spülwassertemperaturen auf 8 – 10 °C absinken. Eine Temperaturdifferenz zwischen Probe und Messgerät ist gegeben. Es erfolgt daher ein Wärmeübergang von der Probe auf das Messgerät.

Gleiches gilt für die Ross & Clark-Methode, da die benutzten Geräte ebenfalls nach der Reinigung mit Chromschwefelsäure mit Leitungswasser gespült werden. Ein einfließender Gasstrom sollte sich über den Leitungsweg und den Kontakt mit einer Flüssigkeitsvorlage und weitere Gaswaschflaschen an die Umgebungstemperatur angepasst haben.

Der geringste Einfluss der Umgebungstemperatur ist bei der NIBEM-Methode zu beobachten, da der Kontakt mit der Messküvette durch ihre geringe Masse, und die nur durch die Elektroden bestehende Wärmeübertragungsfläche zum Messgerät gegeben ist. Durch die Unterbringung des Gerätes in einem Temperierschrank kann der Einflussfaktor des Messgerätes nochmals minimiert werden, die Küvette wird dem Wärmeübergang von der Umgebungsluft auf die Probe entzogen.

Abb. 6.1. zeigt, dass das Schaumvolumen mit steigender Probentemperatur zunimmt. Die Gesetzmäßigkeiten von Henry und Dalton zeigen, dass der Sättigungsdruck mit steigender Temperatur zunimmt, die Gasentbindungsneigung wird größer. Die Blasengröße und der Gasanteil am Schaumvolumen nehmen beim Aufschäumen zu, das Schaumvolumen insgesamt steigt.

Unterstützt wird dieser Effekt durch die herabgesetzte Viskosität, da die Flüssigkeit dem Vorgang des Aufschäumens (einem Verformungsprozess) einen geringeren Widerstand entgegensetzt.

Bei Anwendung eines konstanten Drucks ist der Schaumzerfall mit steigender Temperatur in seiner Gesamtheit schneller, wobei der größere Effekt durch die Verkürzung der Half Life-Time erzielt wird.

Die Verschiebung von Druck und Temperatur kann in einigen Fällen zu einer Überlagerung der Effekte führen, wenn Luftdruck und Temperatur steigen, zeigt sich bei der Half Life-Time ein gegensätzliches Verhalten.

Die Abweichungen des Schaumsverhaltens verdeutlichen nochmals die Notwendigkeit gleicher Verfahrensbedingungen.

In der Drainagephase, mit hohem Flüssigkeitsanteil des Schaums, wirkt sich eine Temperaturerhöhung nicht in entscheidendem Maße aus. Die Drainage wird zwar durch die herabgesetzte Viskosität des Bieres begünstigt, jedoch sind die Blasenwandungen durch das größere Volumen dünner, wodurch auch niederviskoseren Bieren ein erhöhter Widerstand entgegengesetzt wird. Der längere Weg, den die Flüssigkeit aus oberen Schaumschichten zurückzulegen hat gleicht die schnellere Schaumdrainage teilweise aus.

Dies Phänomen tritt bei Weizenbieren verstärkt auf, da die sich bildende Schaumsäule in jeder Temperaturstufe das größte Schaumvolumen bildet.

Die Wärmeeinwirkung der Umgebung auf die Probe bzw. deren Wärmeabgabe an die Umgebung konnte durch die Temperaturmessung des am Ende ablaufenden Bieres festgestellt werden und ist in Tab. 6.1. zu sehen.

### **6.2.2. Absolutdruck**

Der ideale Bierschaum hat nach Fath und Sommer einen Gasanteil  $\geq 90$  %. Ein wesentlich höherer Gasanteil würde zur Bildung von Polyederschaum führen.

Die Berechnung des Gasanteils im Schaum zeigt, dass bei der Ross & Clark-Methode und beim im Lg-Foamtester keine idealen Schäume erzeugt werden. Durch den Analysenansatz mit einer konstanten Biermenge ist die Berechnung des Gasanteils leicht möglich.

Der erste zu messende Schaum im Verlauf der Ross & Clark-Methode, nach Entfernung der nicht aufgeschäumten Biermenge, besitzt einen Flüssigkeitsanteil von ca. 4,5 bis 6 %, was zur Bildung eines polyedrischen Schaums führt.

Beim Lg-Foamtester werden Schäume mit einem deutlich höheren Flüssigkeitsanteil gebildet. Wie in Tab. 6.3. zu sehen ist, liegt der Flüssigkeitsanteil unter normalen Umgebungsbedingungen – zwischen 1000 und 1100 mbar – bei 33 bis 35 %.

Aufgrund der Korrelation zwischen Ross & Clark-Messwerten und der Half Life-Time des Lg-Foamtesters erscheint die Definition eines „idealen“ Schaums zweifelhaft, da unabhängig vom Gasanteil entsprechende Messwerte erreicht werden.

Das Bier als Resultat seiner interagierenden Inhaltsstoffe, die sich auf den Schaum auswirken können, scheint vor dem genannten Hintergrund, unabhängig vom Gas-Flüssigkeits-Verhältnis, ein bestimmtes Schaumverhalten zu haben.

Der Druck bei der Schaumerzeugung hat wesentlichen Einfluss auf dessen Haltbarkeit. Die in der ersten Entwicklungsstufe des Lg-Foamtesters eingebaute Druckkompensation hat während des Aufschäumens einen konstanten

Säuleninnendruck gehalten. Der Schaum wurde deutlich homogener als ein Schaum der Ross & Clark-Methode. Zwei Faktoren spielen beim Aufschäumen eine weitere Rolle, einerseits ist die rund doppelt so lange Zeit des Aufschäumens bei der Ross & Clark-Methode nachteilig, weil der erzeugte Schaum, bereits – wegen der längeren Zeitspanne – wieder zerfällt. Dies ist beim Lg-Foamtester nicht der Fall. Andererseits hat der Schaumzylinder bei Ross & Clark einen deutlich größeren Durchmesser, eine geringe Schaumhöhe wird gebildet, der hydrostatische Druck auf die sich bildenden Blasen ist somit geringer, es können sich größere Blasen bilden. Der Vorgang des Aufschäumens im Lg-Foamtester ist in seiner ersten Phase homogener als bei der Ross & Clark-Methode, da die Turbulenz beim Einströmen des Bieres und der gleichzeitigen Blasenbildung an der Düsenmündung eine Umwälzung des Schaums erzeugt. Die Blasengrößenverteilung wird homogener. Die Gesamtzerfallszeit des Schaums nimmt im relevanten Druckbereich zwischen 1000 und 1100 mbar um 15 s (als Querschnitt 9 verschiedener Biere) ab. Dabei ist zu beobachten, dass die Rückbildung der ersten 50 % des Bieres sich verkürzt (13 s), die Rückbildung weiterer 25 % sich jedoch in der Tendenz verlängert. Begründet ist dies mit steigendem Blaseninnendruck und dem größer werdenden Querschnitt der Blasenwandungen nach dem Aufschäumen. Der Querschnitt der Blasenwandungen, welche die Fließwege bilden, durch die das Bier ablaufen kann, wird mit sinkendem Gasanteil größer. Der Einfluss des Viskositätsverhaltens nimmt somit über eine Verminderung des Gasanteils zu. Die Verlängerung der Half Life-Time beruht wahrscheinlich auf schnellerer Akkumulation oberflächenaktiver Substanzen in der Blasenwand. Die Schaumblasen werden elastischer, der Gibbs-Marangonie-Effekt /6/ wird begünstigt. Der schnellere Flüssigkeitsablauf führt ebenfalls zu einer schnelleren Umlagerung der Blasen in eine stabile Dreierkonfiguration /3/. Hinsichtlich der Bilduntersuchung eines Ausschnitts des zerfallenden Schaums unterliegt die Blasenumlagerung und spätere Koaleszenz mehr zufälligen Ereignissen /3/. Deshalb ist die Größe des beobachteten Ausschnitts und die Auswirkungen auf die statistische Sicherheit zu prüfen. Der Umgebungsdruckeinfluss zeigt, dass offene Systeme zur Bestimmung der Bierschaumhaltbarkeit nur eingeschränkt geeignet sind. Für die Ross & Clark-Methode bedeutet dies, dass der Begriff „Referenzmethode“ fragwürdig erscheint. Innerhalb Deutschlands kann zwischen Brauereistandorten ein Druckunterschied von 115 mbar herrschen. Die Unterschiede bei der Schaumbildung sind eine Ursache voneinander differierender Messwerte.

Für die Ross & Clark-Methode bedeutet dies, dass das manuell geregelte Aufschäumen mittels eines Feindruckreglers in geographisch höher gelegenen Gebieten mit einem reduzierten Gasstrom durchgeführt werden kann.

## 7. Zerfallskinetik des Bierschaums

### 7.1. Ermittlung einer Zerfallskurve

Die Ergebnisse gründen sich auf die Annahme der einführenden Untersuchungen, dass die Half Life-Time sehr gut mit den Ross & Clark-Messwerten korreliert, die First Drain-Zeit für die Beschreibung des Schaums und das Messergebnis keine Relevanz besitzt.

Jeder natürliche, nicht-lineare Zerfallsprozess unterliegt einem logarithmischen Zerfall. Als klassisches Beispiel können die verschiedenen Zerfallsreihen radioaktiver Isotope genannt werden. Innerhalb der Halbwertszeit verringert sich die Anzahl der vorhandenen radioaktiven Atome jeweils um die Hälfte. Es kann daraus gefolgert werden, dass die endgültige Umwandlung eines Isotops in das innerhalb der Zerfallsreihe folgende erst in einer unendlichen Zeitspanne erreicht wird. Die Halbwertszeit liegt je nach Isotop zwischen Sekundenbruchteilen und mehreren Tausend Jahren.

Der Zerfall folgt logarithmischen Ansätzen, wie zum Beispiel

$$y = a \cdot (1 - e^{\frac{-b}{t}}) \quad \text{(Gleichung 7.1.)}$$

oder

$$y = a \cdot e^{b \cdot t} \quad \text{mit } b < 0 \quad \text{(Gleichung 7.2.)}$$

Für den Zerfall eines Schaums gilt prinzipiell das gleiche. Die vollständige Blasenrückbildung wird erst nach einer großen Zeitspanne erreicht, wobei eine rückstandsfreie Blasenrückbildung nicht erreicht wird.

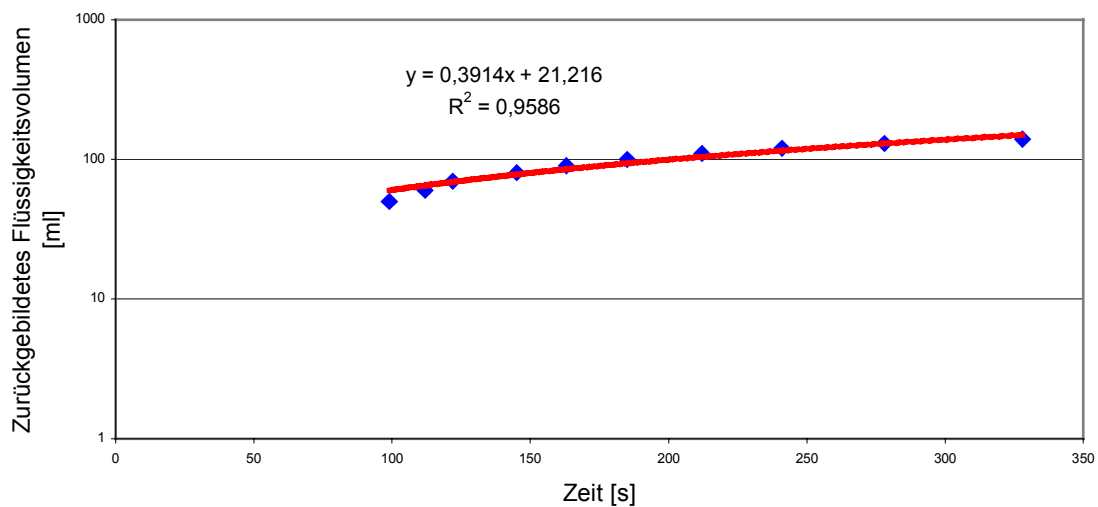
Idealerweise entspräche der Zahlenwert der First Drain-Zeit genau dem Zahlenwert der Half Life-Time. Dies ist jedoch nur in sehr wenigen Messungen aufgetreten. Die Analogie zur Betrachtung der Halbwertszeit eines radioaktiven Isotops und eines Bierschaums wäre jedoch als ideal anzusehen. Werden die Bestandteile des Gesamtsystems (Atome oder Schaumblasen) gezählt, so wird deutlich, dass die Anzahl der Atome deutlich höher sein wird als die Zahl der Schaumblasen.

Zur Verdeutlichung: Wird bei der Betrachtung des radioaktiven Zerfalls von Uran ein Mol ( $6,023 \times 10^{23}$  Atome) betrachtet, handelt es sich dabei um 238,03 g, eine Schaumvolumen von 450 ml beinhaltet eine Blasenanzahl von rund  $10^{10}$ . Eine mathematisch kleinere Zahl steigert das Maß der statistischer Unsicherheit.

Die Langzeitbetrachtung eines Bierschaumzerfalls ermöglicht analog die Aufstellung einer Funktion des oben beschriebenen Typs.

Wird eine Aufzeichnung des Zerfalls durchgeführt, indem die kumulierte Zeit nach jeweils 10 zurückgebildeten ml Flüssigkeit aufgezeichnet wird, kann eine Funktion mit hohem Bestimmtheitsmaß entwickelt werden.

Der Lg-Foamtester erlaubt diese Ablesung erst ab einer Flüssigkeitsmenge von 50 ml. Ab diesem Volumen wird in 10 ml-Schritten bis zur Rückbildung von 140 ml abgelesen. Innerhalb der Rückbildung der ersten 50 ml kann sich die gebildete Schaumsäule beruhigen, Störungen des Systems durch eventuell auftretende Fließbewegungen im Schaum werden damit ausgeschlossen.



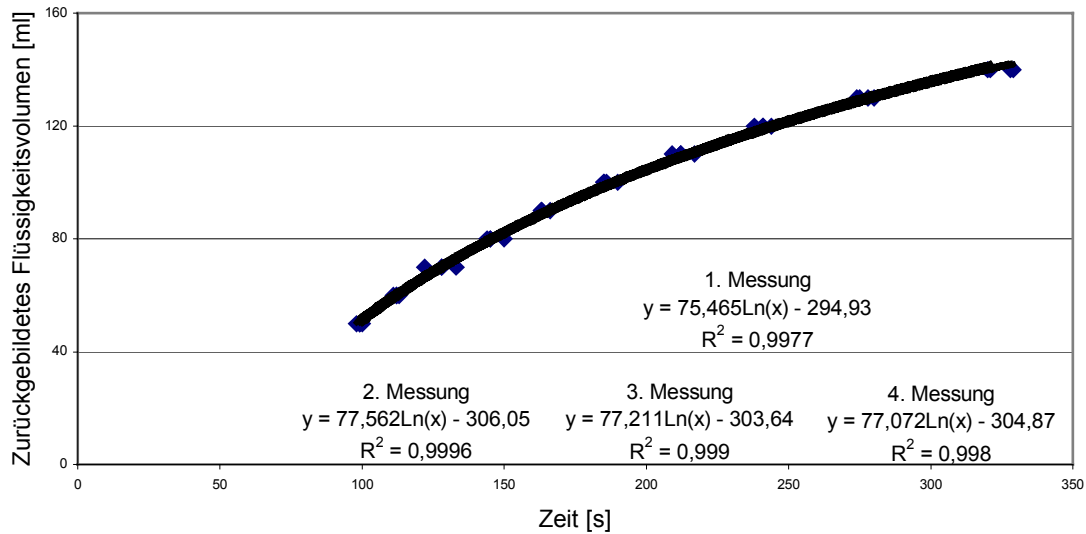
**Abb. 7.1.: Logarithmische Zerfallskurve eines Bierschaums (Pilsener Bier)**

Die relativ ungenaue Skalierung des Messzylinders und der subjektive Fehler bei der Ablesung müssen in die Betrachtung einkalkuliert werden. Spätere graphische Auswertungen zeigen, dass sich die qualitative Aussage nicht ändert, sich jedoch die absolute Höhe der theoretisch ermittelten Schaumkennzahlen deutlich unterscheidet.

Das Bestimmtheitsmaß der Funktion zeigt, dass die logarithmische Ermittlung der Zerfallskurve den Prozess insgesamt gut beschreibt. Vorteile gegenüber der Betrachtung von zwei Momentaufnahmen bestimmter Flüssigkeitsvolumina werden deutlich. Von diesen wird ein Wert (First Drain) bisher nicht zur Betrachtung herangezogen. Der Ausdruck der Schaumstabilität über die Feststellung eines Wertes wird so in Frage gestellt.

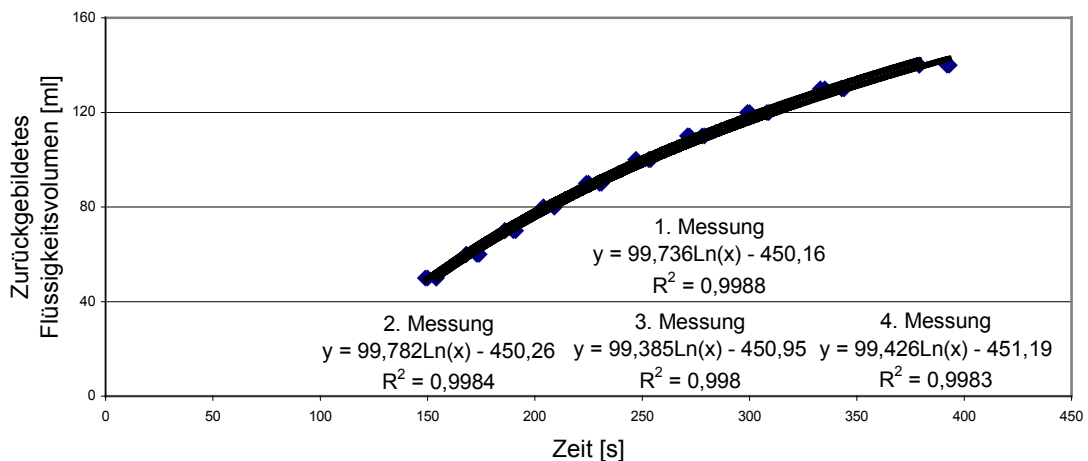
Es erfolgte jeweils die viermalige Messung verschiedener Biere. Exemplarisch soll je ein Diagramm die Wiederholbarkeit der Messungen eines Pilsener Bieres und

eines Weizenbieres zeigen. Andere untersuchte Biere wie Bock, alkoholfreie und Light-Biere zeigen prinzipiell ähnliche Ergebnisse.



**Abb. 7.2.: Reproduzierbarkeit der Messungen der logarithmischen Zerfallskurven eines Bierschaums (Pilsener Bier)**

Eine Korrelation des Faktors bzw. des konstanten Gliedes der oben gezeigten Zerfallskurven des Pilsener Bieres lassen sich jedoch nicht mit anderen physikalischen oder chemischen Parametern in Beziehung setzen.

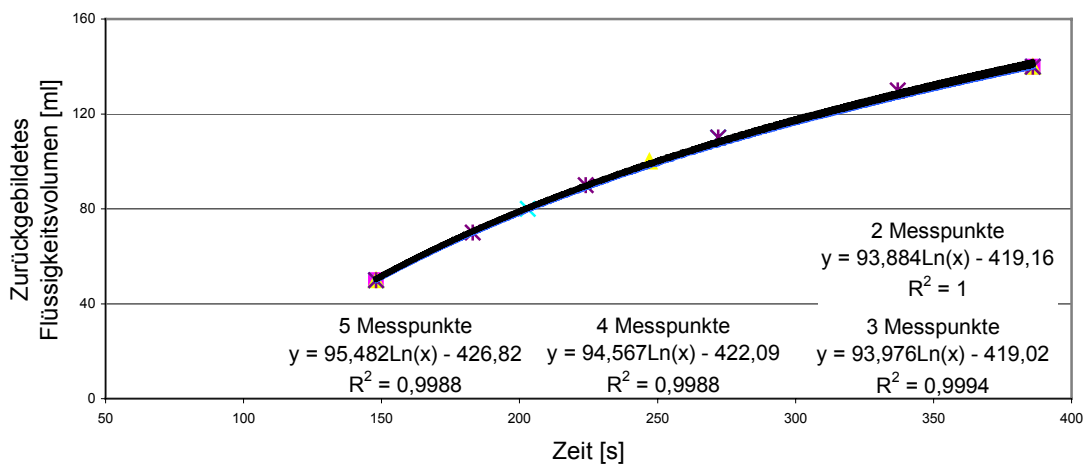


**Abb. 7.3.: Wiederholbarkeit der logarithmischen Zerfallskurven eines Bierschaums (Hefeweizen)**

Die Reproduzierbarkeit der Zerfallskurven und die Betrachtung an mehreren Punkten geben den ablaufenden Zerfallsprozess wieder.

Erfasst werden in der Gerätekonfiguration zwei Messpunkte, die anschließenden Auswertungen zielten auf die Entwicklung der gleichen Kurven mit weniger Messpunkten ab. Hierzu wurden die Anzahl der ermittelten Wertepaare sukzessive reduziert und die Auswirkungen auf die Zerfallskurven graphisch untersucht.

Je mehr Messpunkte aufgezeichnet werden, desto sicherer kann der tatsächliche Verlauf des Bierschaumzerfalls gezeigt werden.

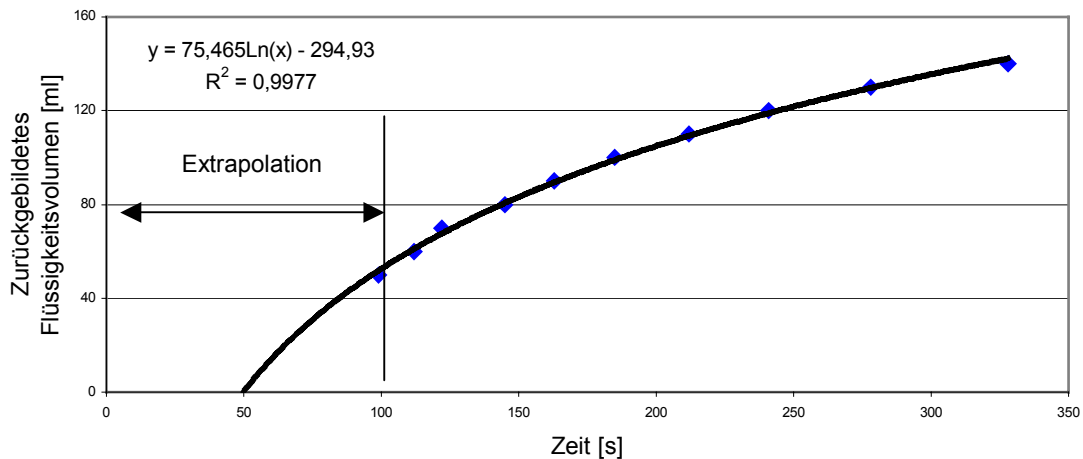


**Abb. 7.4.: Unterschiede der logarithmischen Zerfallskurven mit verschiedener Anzahl von Messpunkten**

Die Kongruenz der Kurven macht deutlich, dass deren Verlauf weitgehend unabhängig von der Anzahl der Wertepaare ist. Ferner ist die Lage der verwendeten Messpunkte für die Kurvenentwicklung unwesentlich.

Die Detektion von 2 Messpunkten kann infolge dessen zur Ermittlung einer Kennzahl der Schaumstabilität beibehalten werden.

Jedoch hat sich bei der Überprüfung des Funktionsweise des Lg-Foamtesters herausgestellt, dass die beiden Messwerte nicht unabhängig voneinander ermittelt werden. Da es sich um 2 Zeitspannen handelt, ist es sinnvoll, die Zählung der Sekunden gleichzeitig zu starten und nicht wie bisher, die Messung der Half Life-Time nach Beendigung der First Drain-Zeit zu starten. Ein eventuell auftretender Messfehler bei der ersten Zeitmessung wird in die zweite übernommen.



**Abb. 7.5.: Extrapolation der Zerfallskurve**

Problematisch stellt sich jedoch die Extrapolation der Zerfallskurve dar, diese lässt den Schluss zu, dass bis ca. 50 s keine Flüssigkeitsbildung stattgefunden hat.

Es entsteht ein systembedingt auftretender Offset, da der Schaumzerfall bereits im Moment der Schaumbildung beginnt.

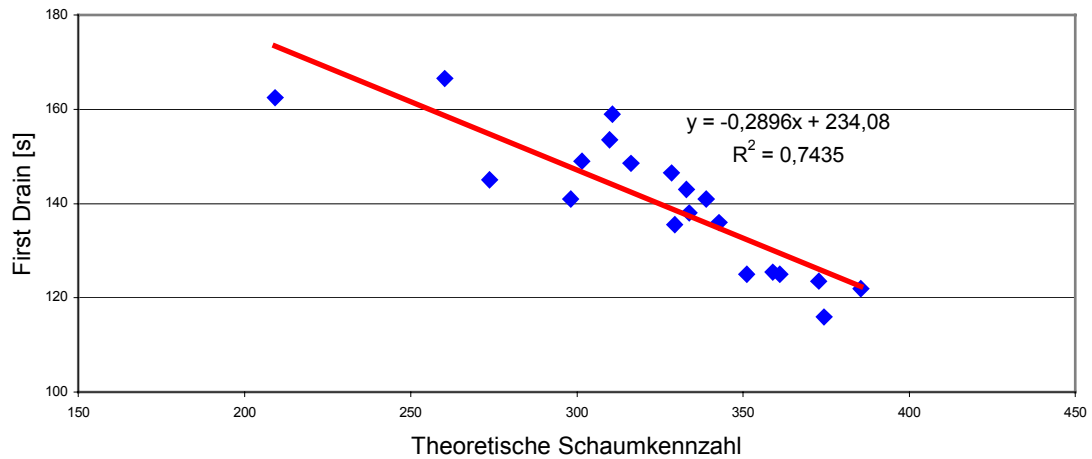
Die Angabe der Half Life-Time als endgültiger Messwert wird durch die Beobachtungen in Frage gestellt, denn die Entwicklung der Zerfallsfunktion stützt sich deutlich stärker auf die First Drain-Zeit als auf die Half Life-Time.

Durch die Beobachtungen des logarithmischen Zerfalls sollte die ermittelte Kurve als Grundlage zur Ermittlung einer „Theoretischen Schaumkennzahl“ genutzt werden. Die Entwicklung der Kennziffer sollte durch die ermittelte Zerfallskurve und die Vorgabe eines konstanten Arguments erfolgen. Es galt zu überprüfen, ob die neu eingeführte Größe hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen nach Ross & Clark ein ebenso gutes Niveau zeigt wie die bisherigen Angabe der Half Life-Time.

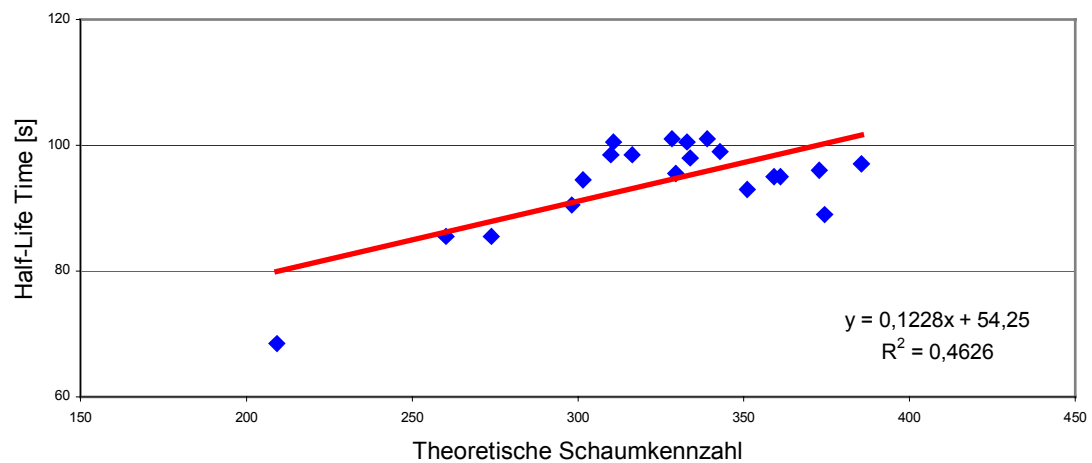
## 7.2. Vergleich der Zerfallskurve mit der bisherigen Ergebnisangabe

Der Vergleich der „theoretischen Schaumkennzahl“ mit den Ross & Clark-Messwerten zeigt eine schlechte Korrelation der beiden Werte miteinander.

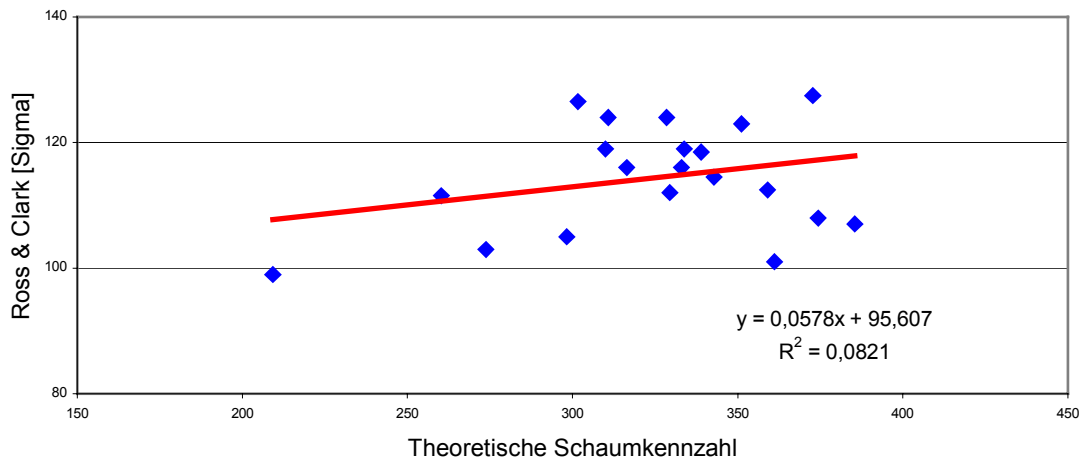
Zu diskutieren wäre, ob die vorhandenen Abweichungen durch Unzulänglichkeiten der Schaumzerfallsfunktion und deren Ermittlung oder durch die Fehler bei der Ross & Clark-Methode zustande kommen.



**Abb. 7.6.: Korrelation der First Drain-Zeit und „Theoretischer Schaumkennzahl“**  
 (n = 20 Wertepaare,  $\alpha = 0,1\%$  (\*\*\*)



**Abb. 7.7.: Korrelation der Half Life-Time und „Theoretischer Schaumkennzahl“**  
 (n = 20 Wertepaare,  $\alpha = 0,1\%$  (\*\*\*)



**Abb. 7.8.: Korrelation zwischen Ross & Clark-Messwert und „Theoretischer Schaumkennzahl“**  
**(n = 20 Wertepaare,  $\alpha > 5 \%$ )**

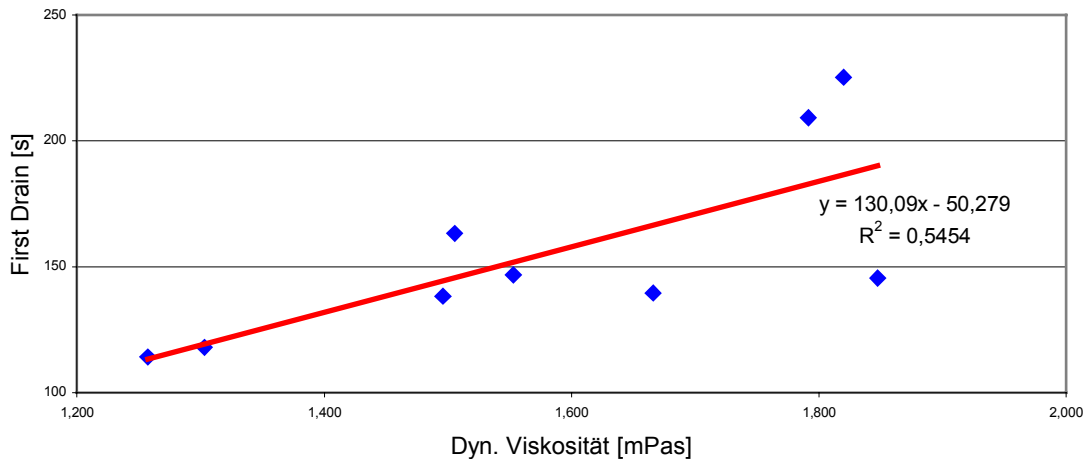
Der Ausdruck einer theoretischen Schaumkennzahl wurde vor den Hintergrund der schlechten Korrelation mit Ross & Clark wieder verworfen. Die Messung von mehr als 2 Punkten führt zu einem apparativen Mehraufwand, der durch keinen weiterführenden Erkenntnisgewinn gerechtfertigt wäre.

### **7.3. Abhängigkeit der Zerfallskinetik von anderen physikalischen Größen**

#### **7.3.1. Viskositätsverhalten**

##### **7.3.1.1. Viskosität und First Drain**

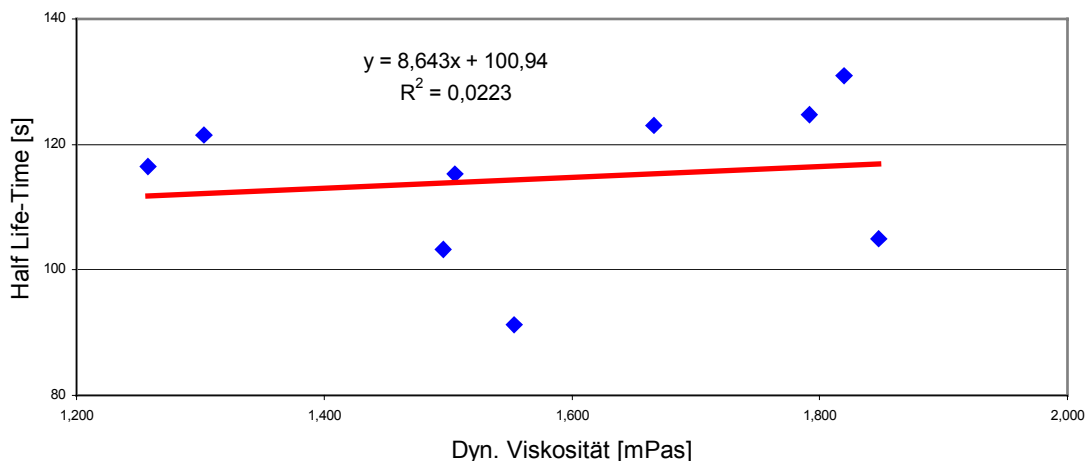
Für die erste Phase des Schaumzerfalls („First Drain“) wurde angenommen, dass die Viskosität Einfluss auf die Flüssigkeitsrückbildung und damit den Schaumzerfall haben würde. Die mathematische Auswertung stützt die Vermutung.



**Abb. 7.9.: Korrelation von dynamischer Viskosität und First Drain-Zeit**  
(n = 9 Wertepaare,  $\alpha = 1 \%$  (\*\*))

### 7.3.1.2. Viskosität und Half Life-Time

Während der zweiten Phase des Schaumzerfalls nimmt der Einfluss der Viskosität auf die weitere Flüssigkeitsrückbildung noch weiter ab. Die sich ergebende Korrelation liegt niedriger ( $R=0,1493$ ), es kann innerhalb dieser Phase kein statistischer Zusammenhang mehr aufgezeigt werden.



**Abb. 7.10.: Korrelation von dynamischer Viskosität und Half Life-Time**  
(n = 9 Wertepaare,  $\alpha > 5 \%$ )

Obwohl kein direkter Zusammenhang der Schaumstabilität mit der Viskosität mit erforderlicher statistischer Sicherheit, gezeigt werden kann, so ist doch durch die

Änderung der Korrelationskoeffizienten zu sehen, dass der Drainageeffekt im Schaum von dessen Viskositätsverhalten beeinflusst wird.

Die Viskosität selbst kann folglich nur als Baustein innerhalb des Gesamtkomplexes angesehen werden.

#### **7.4. Auswirkungen der Ergebnisse auf die Kalibrierstrategie und Forderungen für weitere Modifikationen**

Aus der Verfahrensweise ergeben sich verschiedene kritische Punkte, welche bei der Kalibrierung (Kap. 4.2.1.7.) außer Acht gelassen werden:

1. Der Dichteunterschied zwischen Wasser und Bier wird nicht beachtet. Bei der Kalibrierung des Gerätes mit Bieren höherer Stammwürzegehalte und entsprechend steigender Dichte (Bockbiere) wird die Abweichung immer größer.
2. „Standard“-Biere sind nicht zu definieren. In der Tendenz ist die Schaumhaltbarkeit bei Brauereien, welche große Chargen einer Biersorte herstellen, nahezu gleichbleibend, jedoch sind auch bei der Konstanz des Herstellungsprozesses rohstoffbedingte Abweichungen nicht auszuschließen, welche sich auf die Schaumhaltbarkeit auswirken können.
3. Die Düse stellt immer ein dynamisches System dar. Unterschiede im CO<sub>2</sub>-Gehalt des Bieres führen zu Unterschieden bei der Gasentbindung in der Düse selbst.
4. Im Hinblick auf die Bierzusammensetzung ist auch die Viskosität ein weiterer entscheidender Punkt. Eine erhöhte Viskosität führt zu einem erhöhten Widerstand in der Düse und damit zu einer Minderdosierung von Flüssigkeit in den Schaumzylinder.

Zu 1.)

Die Dichte von reinem Wasser bei 20 °C beträgt 0,99824 g/ml. Die Dichte von Bier kann deutlich darüber liegen. So kann bei starken Bockbieren von einer Dichte von bis zu 1,025 g/ml ausgegangen werden.

Die Berechnung des dosierten Volumens mit den beiden genannten Dichten und ausgehend von einer konstanten Dosage von 164 g entsteht eine Differenz der dosierten Menge von 4,3 ml. Dies entspricht einer Minderdosierung von 2,7 %.

Die teilweise gravierenden Unterschiede des dosierten Gewichts im Verhältnis zum dosierten Volumen haben als Minderdosierung einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis.

Zu 2.)

Die Kalibrierung mittels eines „Standard“-Bieres stellt eine falsche Weise der Kalibrierung da. Die umgekehrte Verhaltensweise wäre korrekt. Die Kalibrierung sollte durch ein Bier, dessen Schaumwerte in der Tendenz bekannt sind, eventuell verglichen mit einem Referenzgerät, überprüft werden.

Auch diese Überprüfung kann jedoch nicht als Referenz gelten, sondern lediglich Hinweise auf die Qualität der Kalibrierung geben.

Zu 3.)

Innerhalb der Düse erfolgt der Druckabbau von einem Vordruck von 4,0 bar auf den Umgebungsdruck. Die Stelle innerhalb der Düse an der die tatsächliche Entbindung der CO<sub>2</sub> stattfindet, kann nicht bestimmt werden. Eine mathematische Beschreibung der Vorgänge innerhalb des Systems Düse/Magnetventil kann allenfalls näherungsweise durchgeführt werden.

Die Entbindung ist jedoch direkt anhängig vom Sättigungsdruck des Bieres, je höher dieser ist, umso früher wird sich, betrachtet über die Länge der Düse, das Kohlendioxid entbinden.

Neben Punkt 2.) kann auch der 3.) nur theoretisch beschrieben werden. Mit den zur Verfügung stehenden Mitteln kann keine Untersuchung der entsprechenden Parameter erfolgen.

Zu 4.)

Die Dosierung des Bieres in den Messzylinder hängt neben den bereits beschriebenen Abhängigkeiten auch von der Viskosität des zu untersuchenden Bieres ab.

Mittels einer Modelllösung aus dest. Wasser, Ethanol und steigende Mengen Ethylenglykol – zur Erhöhung der Viskosität – wurden Versuche angestellt, den Einfluss auf die dosierte Flüssigkeitsmenge zu überprüfen.

Die Untersuchung erfolgt in einer Dosierzeit von 10 s, zunächst wurde das dosierte Gewicht gemessen, durch eine begleitende Dichtefeststellung wurde auf das Volumen umgerechnet. Die durch Verkürzung der Dosierzeit geringere Menge wurde – wie bei der Kalibrierung – auf die innerhalb der Einstellung vorgesehenen 26,4 s des Testgerätes umgerechnet (Tab. 5.3.).

Die gesamte Kalibrierung kann durch zwei Schritte wesentlich vereinfacht werden:

1. Einsatz einer induktiven Durchflussmessung zur genauen, viskositäts-unabhängigen Dosierung der Biermenge von 164 ml. Eine gleichbleibendes Flüssigkeitsvolumen ist somit gegeben, die oben angeführten Unterschiede zwischen dosierter Biermenge in g und ml kehren sich um. Abweichungen ergeben dann in Richtung des dosierten Biergewichtes.  
Gleichzeitig werden durch ein konstantes Biervolumen die realen Verhältnisse beim Ausschank besser wiedergegeben, da dieser auch nach Volumen erfolgt.
2. Wird zur Messwertermittlung die beschriebene Zerfallsfunktion verwendet, ist deren Ermittlung unabhängig von der Lage der erfassten Messwerte auf der Zerfallskurve. Jedoch sollte die Detektion einen volumetrischen Mindestabstand haben, damit die statistische Sicherheit nicht durch direkt aufeinander folgende Detektionen beeinträchtigt wird.

#### **7.5. Diskussion der Ergebnisse**

In den einführenden Untersuchungen wurde die Half Life-Time des Lg-Foamtesters als mit den Ross & Clark-Werten gut korrelierender Zahlenwert erkannt.

Als Prinzip gilt bei Ross & Clark die Ermittlung der mittleren Lebensdauer der Schaumblasen. Sie wird festgestellt aus dem Verhältnis der Zerfallszeit des Schaums und dem Logarithmus des Verhältnisses des zerfallenen zum noch vorhandenen Schaum.

Nach dem Aufschäumen schließt sich eine Drainagezeit von 120 s an, gefolgt von einer vorgegebenen Zerfallszeit von 150 s.

Diese Vorgehensweise deckt sich mit der Lg-automatic-Methode bei der zuerst eine Drainage abläuft. Im volumetrisch gesehen dritten Viertel des aufgeschäumten Gesamtvolumens wird die Halbwertszeit des Schaums und damit die mittlere Lebensdauer der Schaumblasen gemessen. Durch die Auswahl des dritten Viertels als ausschlaggebende Größe werden statische und zufällige Einflüsse auf die Schaumhaltbarkeit minimiert.

Nach der bei Ross & Clark vorgegebenen Zerfallszeit von 150 s wird das zurückgebildete Bier ausgewogen, der verbliebene Schaum mittels Ethanol niedergeschlagen und ebenfalls gewogen.

Die Berechnung des  $\Sigma$ -Wertes erfolgt nach der Formel:

$$\Sigma = \frac{150}{2,303 \cdot \log \frac{b_{K\&S} + c_{K\&S}}{c_{K\&S}}} \quad \text{(Gleichung 7.3.)}$$

Der ermittelte Messwert als Ausdruck der Schaumqualität wird bei beiden Analysenmethoden auf zwei Momentaufnahmen gestützt. Grundsätzlicher Unterschied ist jedoch die vorgegebene Zerfallszeit bei Messung des zurückgebildeten Volumens bzw. das vorgegebene Volumen bei Feststellung der zugehörigen Zerfallsdauer.

Durch die Modellierung einer Zerfallskinetik kann der gesamte Vorgang der Schaumabnahme betrachtet werden. Die sich dadurch ergebenden Vorteile für die Kalibrierstrategie liegen auf der Hand, da der Zerfall durch zwei Parameter beschrieben werden kann. Dies gilt für die beiden anderen Wege der Ergebnisermittlung ebenso, jedoch ist die Zerfallskurve in ihrer Abstufung und Charakterisierung deutlich differenzierter; Unterschiede der Biere und verschiedener Proben einer Biersorte werden exakter beschreibend abgebildet.

Die sehr gute Korrelation zwischen den First Drain-Werten ( $R = 0,8623$ ) und der nach der Zerfallskurve ermittelten „Theoretischen Schaumkennzahl“ zeigt, dass der erste Teil des Zerfalls relativ genau entlang der ermittelten Kurve des Schaumzerfalls stattfindet. Die im dritten Viertel ermittelte Half Life-Time scheint sich, bewiesen durch die schlechtere Korrelation, von der interpolierten Zerfallskurve zu lösen. Der Korrelationskoeffizient von  $R = 0,6802$  macht dies deutlich.

Die bisherige Ergebnisangabe als einfacher Zahlenwert ist immer gerundet. Geringere Unterschiede in Bruchteilen von Sekunden können nicht erfasst werden. Eine genauere Darstellung von First Drain und Half Life-Time könnten die Korrelationskoeffizient verbessern.

## 8. Weiterentwickelte Schaummesstechnik

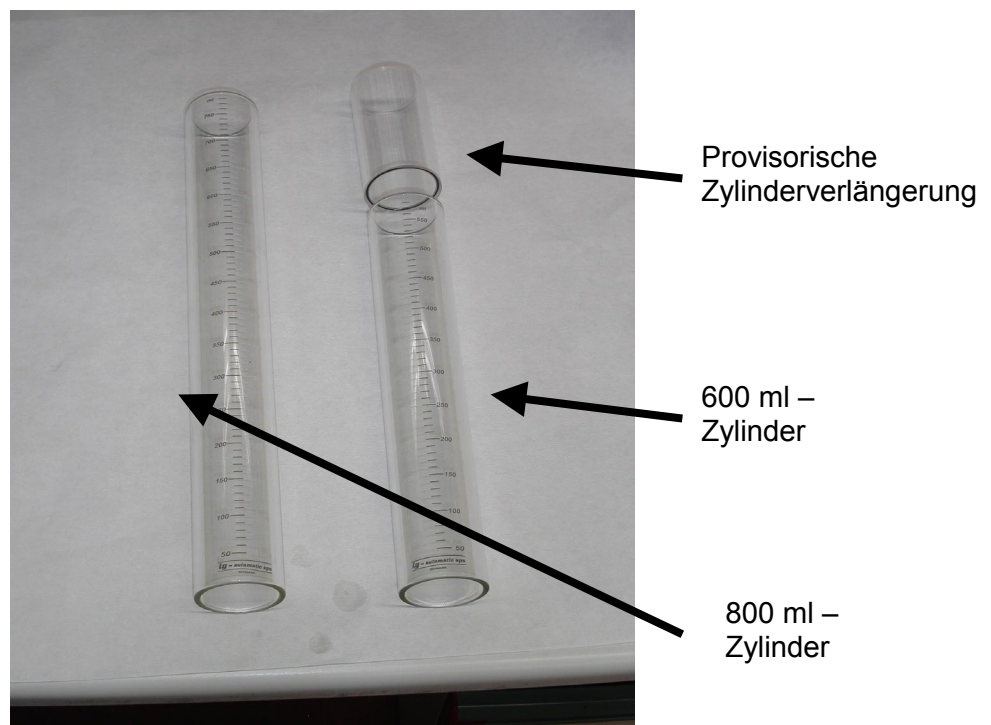
Die verschiedenen Entwicklungsstufen des Lg-Foamtesters wurden nur kurz angedeutet. Die Grundkonzeption des Gerätes wurde in Kapitel 4.2.1. dargestellt. Die Fortschritte bei der Weiterentwicklung sollen einzeln aufgezeigt werden.

### 8.1. Erster Entwicklungsschritt

Die erste Entwicklungsstufe ist gekennzeichnet durch die Anpassung des Lg-Foamtesters an Biere mit einem höheren  $\text{CO}_2$ -Gehalt. Wie beschrieben wurde der Treibgasdruck von 2,5 auf 4,0 bar angehoben. Der zweite Schwerpunkt dieser Maßnahme lag in der Vergrößerung des Zylindervolumens von ca. 600 ml auf rund 800 ml.

Da nicht sofort große Glaszylinder zur Verfügung standen, wurde provisorisch mit einer Plexiglas-Verlängerung gearbeitet.

In der folgenden Abbildung können die 3 verschiedenen sich ergebenden Zylindervarianten gesehen werden.



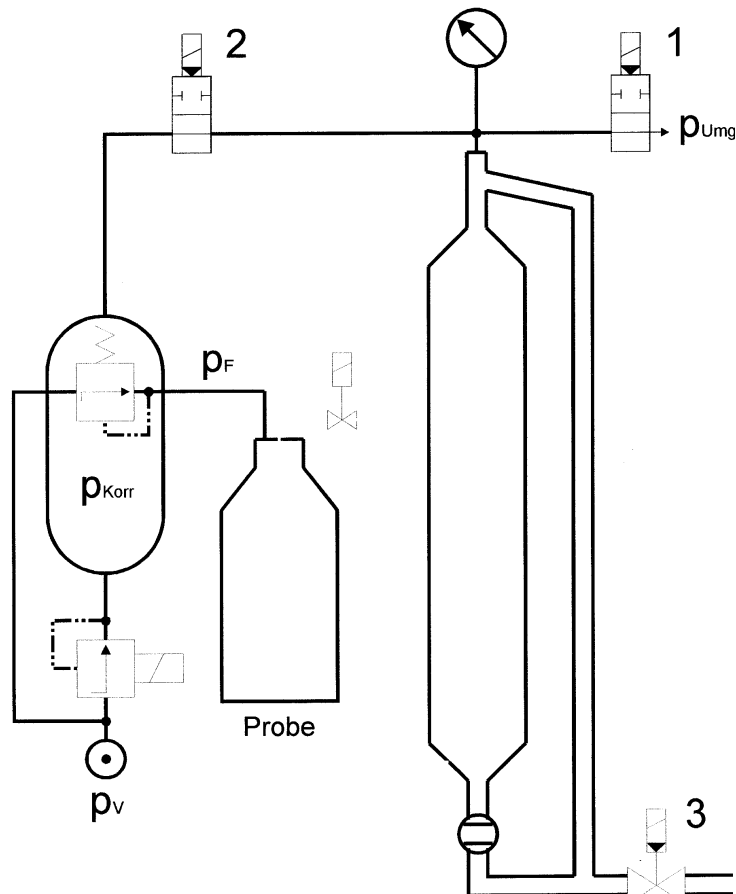
**Abb. 8.1.: Zylindervarianten der ersten Entwicklungsstufe**

Die erste Entwicklungsstufe war jedoch weiterhin den Milieubedingungen ausgesetzt.

## 8.2. Zweiter Entwicklungsschritt

Im Rahmen des zweiten Entwicklungsschritts wurde durch eine Druckkompensation eine direkte Einwirkung auf die Milieubedingungen in der Messkammer vorgenommen.

In der Abb. 8.2. wird die Funktionsweise der Druckkompensation deutlich.



- 1 Ventil zur Umgebung
- 2 Ventil zum Korrekturvolumen
- 3 Abflussventil

**Abb. 8.2.: Schematische Darstellung der Funktionsweise der Druckkompensation**

Durch die Anwendung eines Korrekturvolumens wird die Möglichkeit geschaffen, dass das Gerät während des Aufschäumens den eingestellten Innendruck hält. Die Verwendung eines Korrekturvolumens ist erforderlich, da das Volumen der Schaumsäule zu klein ist, um eine sichere Ausregelung zu gewährleisten. Eine

Druckerhöhung durch Verdrängung von Gas im Schaumzylinder kann nicht auftreten.

Der aus der Gasflasche austretende Druck ( $p_v$ ) wird durch einen Druckminderer auf einen Wert kurz oberhalb des Förderdrucks ( $p_f$ ) eingeregelt. Der absolute Förderdruck liegt exakt 4000 mbar über dem eingestellten Säuleninnendruck (hier: 1100 mbar). Weiterer interner Druckminderer erzeugt aus dem Förderdruck den Druck des Korrekturvolumen und damit des Säuleninnendrucks. Ventil 2 stellt die Verbindung zum Korrekturvolumen dar. Ventil 1 ist das Entlastungsventil zur Umgebung nach beendeter Messung.

Ein auf dem Schaumzylinder angebrachtes Manometer zeigte während aller druckkompensierten Messungen einen konstanten Innendruck des Gerätes.

Neben der Druckkompensation wurde eine Temperierung des Spülwassers durchgeführt. Als Speicher für temperiertes Wasser wurde ein handelsüblicher Heißwasserbereiter verwendet (Inhalt ca. 200 l). Der Heißwasserbereiter wurde durch einen Thermostaten temperiert.

Nach einer Vorlaufzeit, in der das Gesamtvolumen auf die eingestellte Temperatur gebracht wird, reicht die Kälte- bzw. Wärmeleistung des Thermostaten aus, das Reservoir auf dem gewünschten Wert zu halten.

Durch eine mögliche Einstellung von Druck und Temperatur können die relevanten Umgebungseinflüsse untersucht werden.

In den beiden ersten Entwicklungsstufen wurden hinsichtlich der Technologie der Dosierung keine Änderungen vorgenommen, was zunächst wegen der konstanten Druckdifferenz zum eingestellten Messzylinder-Innendruck nicht nötig erschien.

Es bleibt jedoch zu bemerken, dass die treibgasführenden Einbauten nicht ausgetauscht wurden. Gleiches gilt für das Magnetventil am Probeneinlass.

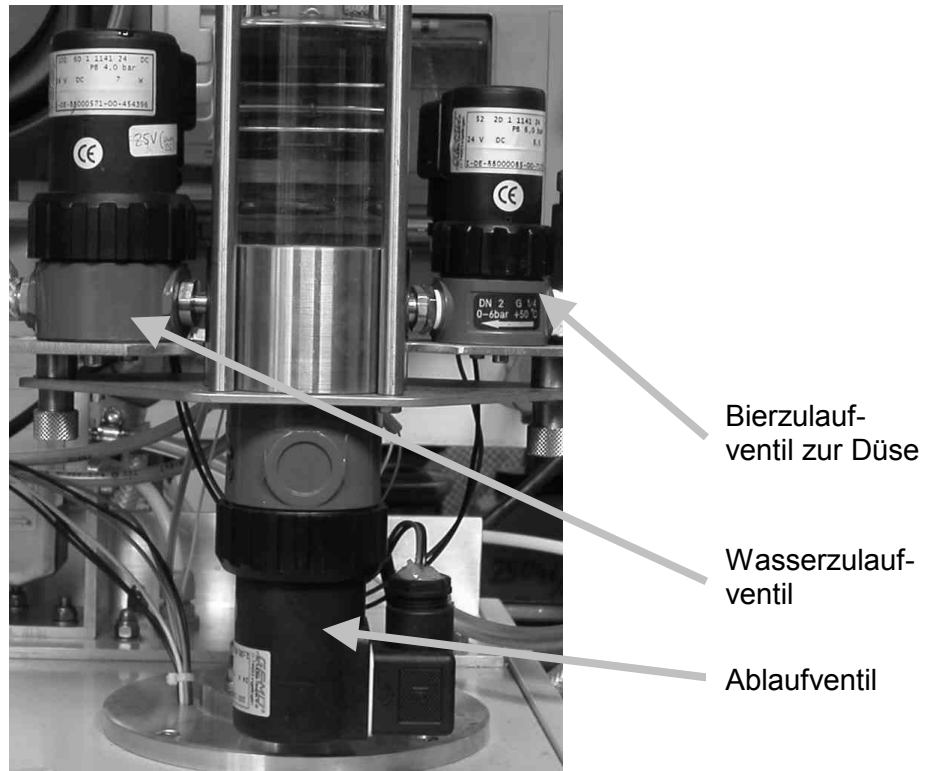
### 8.3. Dritter und letzter Entwicklungsschritt

In der Gesamtansicht der letzten Entwicklungsstufe können verschiedene Modifikationen gesehen werden, wobei die Details nachfolgend beschrieben werden.



**Abb. 8.3.: Gesamtansicht der Lg-Foamtesters in der dritten Entwicklungsstufe**

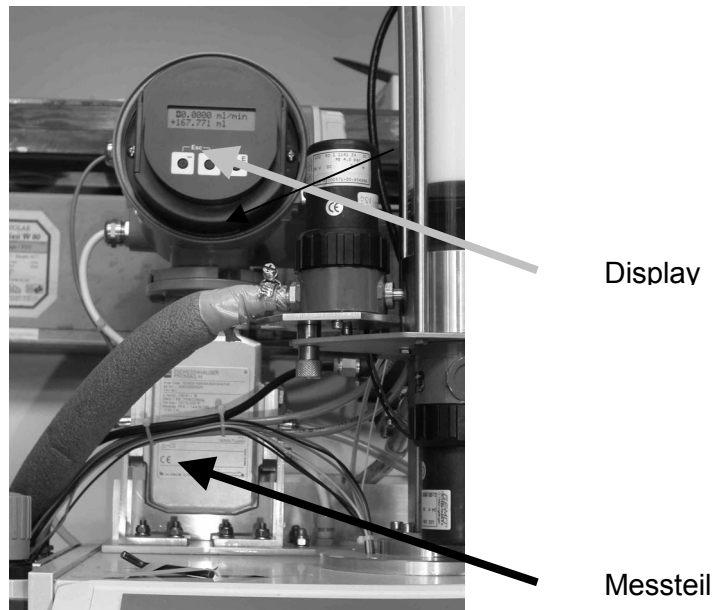
Wie bereits in der zweiten Entwicklungsstufe wurden Messtemperatur und –druck per Definition auf 20 °C bzw. 1100 mbar festgelegt. Das zentrale Kugelventil, welches den Schaumzylinder nach unten hin abschloss und in Verbindung mit dem Bedienhebel das wesentliche Bedienelement des Lg-Foamtesters darstellte, wurde durch 3 Magnetventile ersetzt. Alle Ventile sind auf den Betriebsdruck von mindestens 4 bar (zuzüglich des eingestellten Säuleninnendrucks) ausgelegt.



**Abb. 8.4.: Ventile am Sockel des Schaumzylinders**

Zur exakten Volumendosierung wurde ein induktiver Durchflussmesser eingebaut (Fabrikat: Endress & Hauser, Nennweite 4 mm). Die dosierte Biermenge wurde nicht mehr zeitgesteuert eingebracht.

Durch die Verlängerung des Leitungsweges zwischen Ansticheinrichtung und Düse, welche sich durch den Einbau des IDM ergibt, musste die Dauer des „Bleed“-Vorganges von 9 auf 13 s angehoben werden.



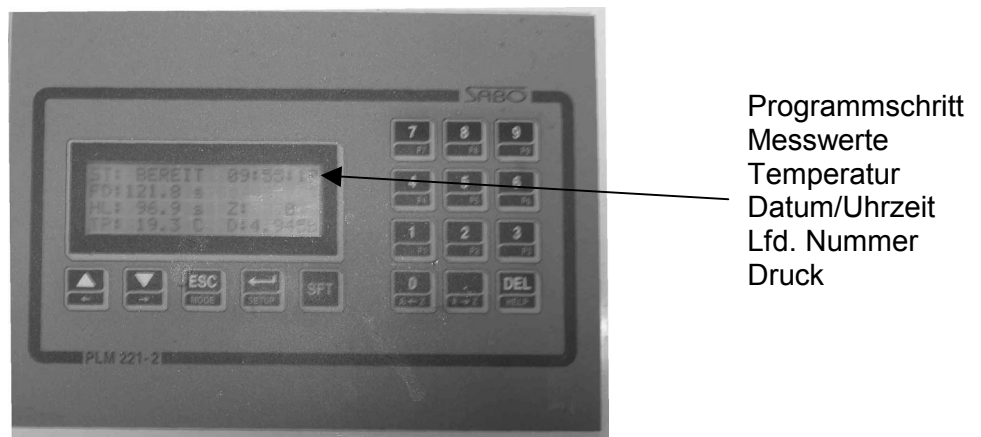
**Abb. 8.5.: Induktive Durchflussmessung**

Die Detektion der aus dem Schaum zurückgebildeten Flüssigkeitsmenge erfolgt wie bisher mittels der beschriebenen Lichtschranken (Abb. 4.5.)

Die Auswertung erfolgt nicht im Verlauf der Messung, sondern prozessorgesteuert werden die Messwerte nach Messende auf einem Display ausgegeben.

Auf dem Display werden neben den Messergebnissen weitere Messwerte angezeigt, dies sind:

- Anzeige des momentan ablaufenden Programmschrittes
- Innentemperatur der Schaumsäule im Sockel
- Datum / Uhrzeit
- Laufende Nummer des ablaufenden Programmschrittes
- Absolutdruck in der Bierleitung unmittelbar vor der Kombination Ventil/Düse



**Abb. 8.6.: Display**

Das Display dient nicht nur der Ausgabe der verschiedenen Werte bzw. Statusanzeigen, sondern beinhaltet die Bedienelemente des Lg-Foamtesters. Durch die Belegung von Funktionstasten werden die verschiedenen Funktionen des Gerätes gestartet und beendet.

### **Ablauf einer Messung**

Nach Anstechen der Probe erfolgt der „Bleed“-Vorgang außerhalb des Programms durch manuelles Starten des Unterprogramms (Taste F9).

Durch Betätigung der „Enter“-Taste wird die Messung gestartet. Programmgemäß laufen dann folgende Schritte ab:

1. Dreimaliges Spülen des Gerätes für jeweils 30 s, jeweils unterbrochen durch die Ablaufzeiten des Wassers.
2. Einstellung des gewünschten Drucks in der Schaumsäule (1100 mbar)
3. Einschäumen des Bieres
4. Schaumzerfall bzw. Messung
5. Ruhezeit zur Berechnung und Ausgabe der Messwerte
6. Entspannen der Schaumsäule auf Umgebungsdruck
7. Ablaufzeit des Bieres aus der Schaumsäule

Der Ablauf dieser Programmschritte erfolgt ohne weitere Bedienung.

Die Einstellung des gewünschten Säuleninnendrucks erfolgt auch in dieser Entwicklungsstufe durch den gleichen Aufbau wie in der vorherigen (Abb. 8.2.) Durch ein Manometer auf der Schaumsäule kann der Innendruck gemessen werden.



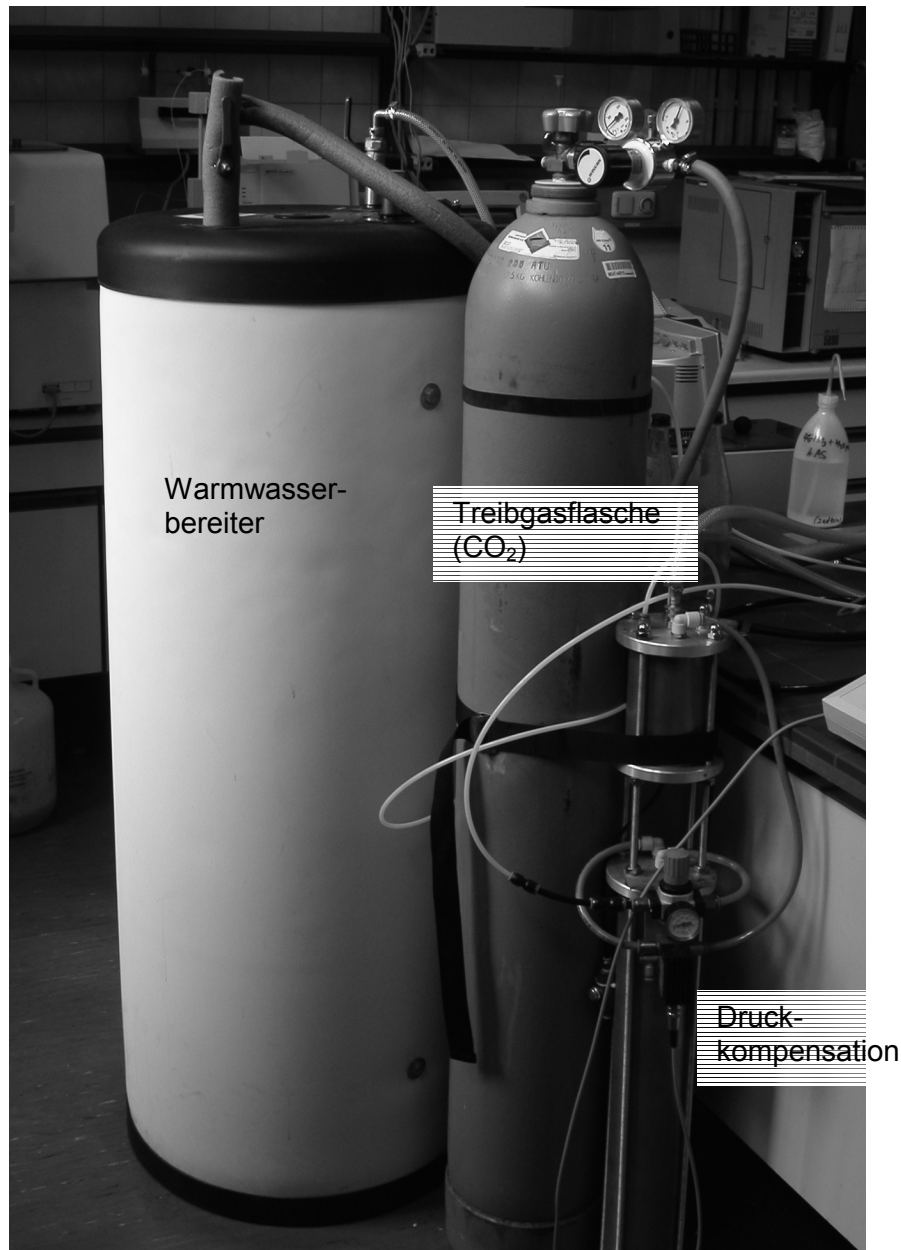
**Abb. 8.7.: Manometer und Ventile auf der Schaumsäule**

Der Innendruck wird auf 1100 mbar ( $\pm 1$  Digit) eingestellt.

Die Temperatur wird durch die Temperierung der Probe selbst und des Spülwassers eingestellt.

In der folgenden Abbildung können sowohl Druck- und Temperatureinstellung gesehen werden.

Die Umsetzung der Forderungen nach gleichem Druck und Temperatur kann in der vorliegenden Form wegen der Größe der Nebenaggregate zum Lg-Foamtester lediglich als Versuchsaufbau bezeichnet werden.



**Abb. 8.8.: Versorgungseinrichtungen zum Lg-Foamtester**

Insgesamt kann die dritte Entwicklungsstufe hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit als deutliche Verbesserung im Vergleich zu allen anderen vorliegenden Geräten bezeichnet werden. Der Personalaufwand selbst wird nochmals minimiert.

Über die Displaysteuerung können nicht nur programmgesteuerte Vorgänge gestartet werden, sondern auch Eingriffe in das Gerät selbst sind möglich. Alle Ventile können manuell geschaltet werden, die Einstellung der verschiedenen Programmvorgaben ist ebenfalls möglich.

#### **8.4. Kalibrierstrategie**

Die Schwachpunkte der bisherigen Kalibrierstrategie wurde im letzten Kapitel aufgezeigt. Eine einfachere und sichere Methode stellt die folgende dar.

Die niedrigen Fertigungstoleranzen erlauben eine exakte Kalibrierung der zurückgebildeten Volumina durch den Einsatz von Passstücken. Die Passstücke werden in den Gerätesockel eingesetzt, die Lichtschranken werden an die Schaltepunkte herangeführt. Die Stellschrauben an der Aufhängung der Lichtschranken (Abb. 4.5.) schaffen diese Möglichkeit.

Die Kalibrierung der Volumendosierung entfällt wegen der induktiven Durchflussmessung ganz.

Die durch die unterschiedlichen Bierviskositäten und CO<sub>2</sub>-Gehalte verursachten Volumenveränderungen wurden beseitigt. Unabhängig von den beeinflussenden Parametern werden 164 ml Bier durch die Düse in den Zylinder eingeschaumt.

Somit kann die Kalibrierstrategie als deutlich vereinfacht bezeichnet werden.

Werden die vorgeschriebenen Reinigungsintervalle eingehalten und erfolgt kein Eingriff in die werksseitigen Einstellungen kann ohne weitere Kalibrierungen gearbeitet werden.

#### **8.5. Abschließende Untersuchungen**

Die Abhängigkeiten der Messung der Bierschaumstabilität wurde durch die Untersuchung verschiedener Einflüsse hinreichend gezeigt.

Als abschließender Vergleich sollten die Verbesserungen der dritten Entwicklungsstufe gegenüber dem ursprünglichen Lg-Foamtester statistisch erfasst und bewertet werden. Ferner sollte nochmals mit der Messmethode nach Ross & Clark verglichen werden.

Hierzu wurde die Standardabweichung bei der 100fachen Messung eines Pilsener Bieres mittels des ursprünglichen Lg-Foamtesters ermittelt.

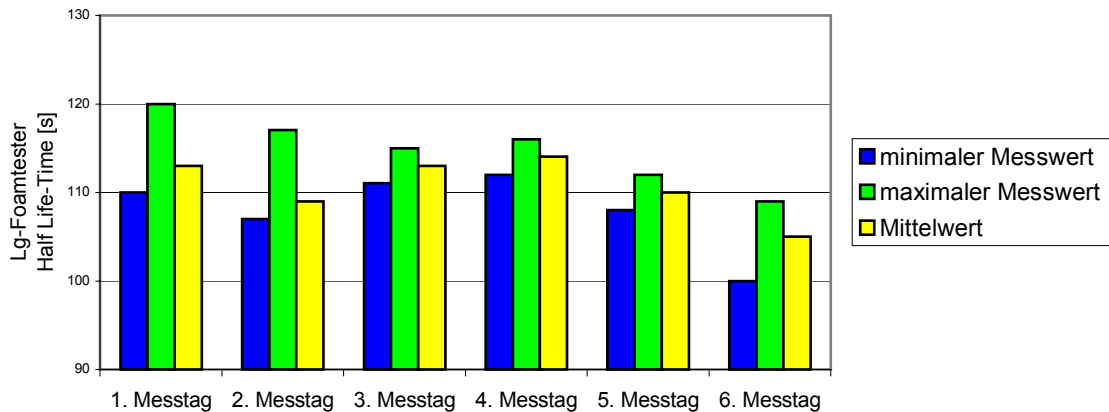
Die drei ermittelten Messwerte zeigten folgende Standardabweichungen:

**Tab. 8.1.: Standardabweichungen bei 100 Messungen (Pilsener Bier)**

| Parameter      | Standardabweichung | Mittelwerte der Messungen |
|----------------|--------------------|---------------------------|
| Schaumvolumen  | 9,22               | 441,65                    |
| First Drain    | 4,40               | 135,62                    |
| Half Life-Time | 3,60               | 109,81                    |

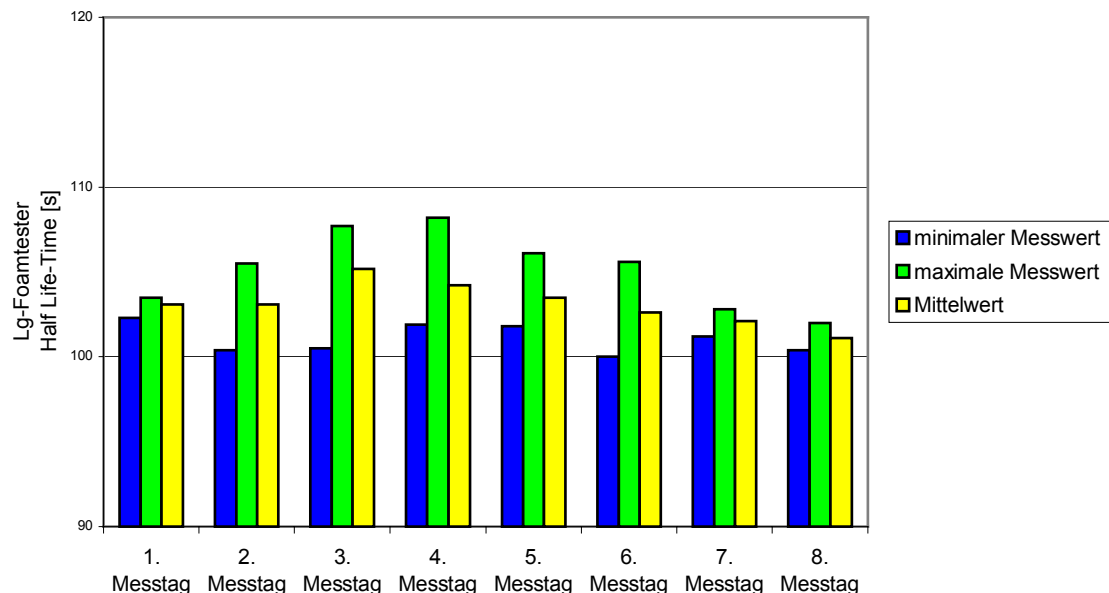
Diese abstrakten Werte zeigen an sich keine Tendenz an.

Werden die Messungen, welche absichtlich an verschiedenen Tagen (innerhalb einer Kalenderwoche) in unterschiedlicher Anzahl durchgeführt worden sind, verglichen, zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen minimalem und maximalem Messwert bei der Grundkonzeption des Gerätes.



**Abb. 8.9.: Minimaler und maximaler Messwert bei der Grundkonzeption des Lg-Foamtesters**

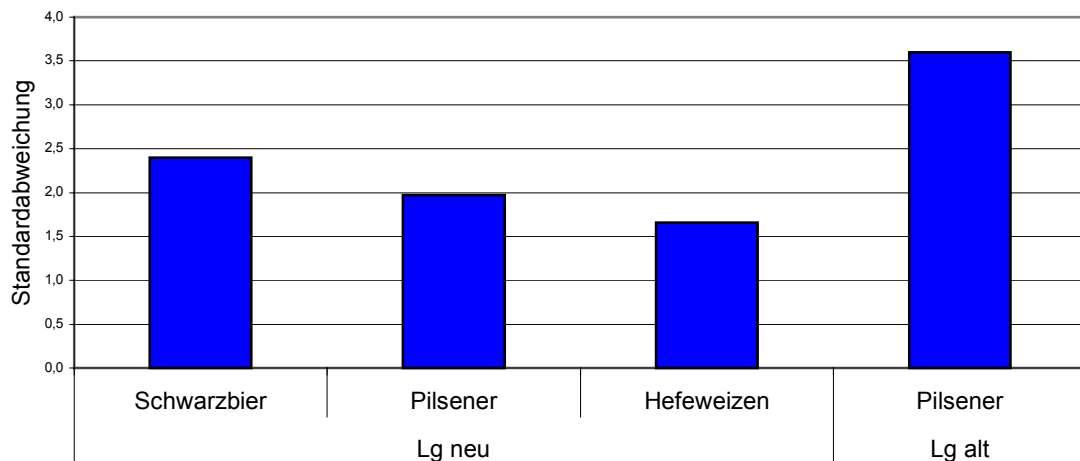
Die Ergebnisse beim Einsatz der neuen Messtechnik werden in der Untersuchung des gleichen Bieres und der gleichen Anzahl von Messungen dargestellt:



**Abb. 8.10.: Minimaler und maximaler Messwert bei der 3. Entwicklungsstufe des Lg-Foamtesters**

Bei Vergleich der beiden Messsysteme miteinander zeigt sich eine deutliche geringere Messwertspreizung der neuen Messtechnik.

Im weiteren Verlauf sollte das deutlich bessere Ergebnis hinsichtlich der Standardabweichung durch Messung anderer Biere verifiziert werden. Dazu wurde je ein Bier mit ausgewählt, welches in den einführenden Untersuchungen einen schlechteren bzw. besseren Schaum zeigte.



**Abb. 8.11.: Vergleich der Standardabweichungen der verschiedenen Geräte und Biersorten**

**Tab. 8.2.: Weitere statistische Kennwerte zur Beschreibung der verbesserten Schaummessung**

|        |             | Anzahl<br>Messungen<br>n | Standard-<br>abweichung<br>s | Mittelwert<br>$\bar{x}$ | relative<br>Varianz,<br>bezogen<br>auf $\bar{x}$ | Konfidenz-<br>intervall um<br>den<br>Mittelwert |
|--------|-------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Lg alt | Pilsener    | 100                      | 3,60                         | 109,81                  | 0,0328                                           | 0,7060                                          |
| Lg neu | Pilsener    | 100                      | 1,97                         | 103,69                  | 0,0190                                           | 0,3858                                          |
|        | Schwarzbier | 54                       | 2,40                         | 105,57                  | 0,0227                                           | 0,6396                                          |
|        | Hefeweizen  | 30                       | 1,69                         | 109,60                  | 0,0154                                           | 0,6038                                          |

Das Ergebnis zeigt, dass die neue Messtechnik hinsichtlich der Messwertspreizung und der statistischen Sicherheit der Messung deutlich bessere Ergebnisse liefert. Durch die Kompensation von Druck und Temperatur auf konstante Werte werden

die Messwerte stabiler. Auch die einheitliche Dosierung mittels eines IDM wirkt sich positiv aus.

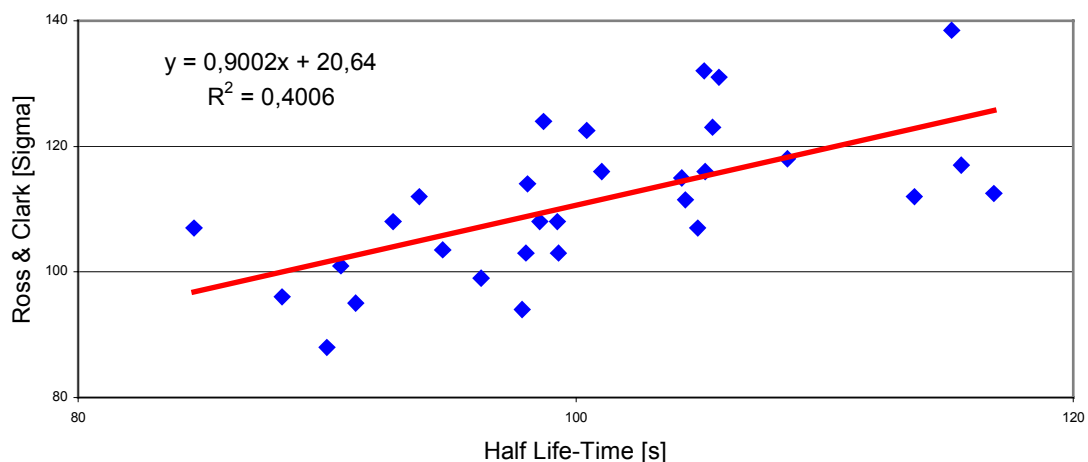
Die Differenz zwischen maximal und minimal dosiertem Biervolumen betrug seit Einbau des induktiven Durchflussmessers 3 % (ca. 5 ml), dieser Wert wird trotz einer Temperaturspanne von 2 °C erreicht. Rein rechnerisch ist einer Temperaturdifferenz von 2 °C ein Unterschied von 9,4 ml beim Urgerät gegenüberzustellen. Die deutlich stabileren Messwerte sind, gepaart mit einem reduzierten Zeitaufwand für das Bedienpersonal, als wesentlicher Fortschritt zu bezeichnen.

Einer der Gründe, die zur Optimierung des Lg-Foamtesters geführt haben, war die sehr gute Vergleichbarkeit mit den Messergebnissen nach Ross & Clark.

Diese statistische Größe sollte erhalten bleiben, trotz der nach wie vor bestehenden Abhängigkeit von den Umweltbedingungen bei diesem Messverfahren.

Zur Feststellung der Vergleichbarkeit wurden erneut 30 Biere verschiedener Brauart nach beiden Verfahren gemessen und die Korrelation zwischen den Ergebnissen ermittelt.

Es zeigt sich dabei folgendes Ergebnis:



**Abb. 8.12.: Korrelation zwischen Ross & Clark und Lg-Foamtester**  
(n = 30 Wertepaare,  $\alpha = 0,1 \%$  (\*\*\*))

Der Zusammenhang zwischen beiden Methoden ist nach den durchgeführten Modifikationen deutlich verbessert worden, da im Unterschied zu den einführenden Untersuchungen keine Trennung zwischen Weizenbieren und untergärigen Bieren normalen CO<sub>2</sub>-Gehaltes mehr getroffen werden muss.

Die gewonnene statistische Sicherheit, verbunden mit einer gesteigerten Korrelation der Ergebnisse der Ross & Clark-Methode und des Lg-Foamtesters, wird mit den

gleichen wie in der Ur-Konzeption ermittelten Messwerten (First Drain und Half Life-Time) erreicht.

Der zwischenzeitliche Ansatz der Ermittlung und Auswertung einer Zerfallsfunktion kann vor diesem Hintergrund wieder verworfen werden.

## **8.6. Diskussion der Ergebnisse**

Während der abschließenden Untersuchungen wurden die Modifikationen am Schaummessgerät hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Aussagekraft der gewonnenen Messergebnisse überprüft.

Die Temperierung der Probe sowie des Spülwassers und damit des Messgerätes sind verbunden mit der Einstellung eines konstanten Säuleninnendrucks, diese sind in erster Linie für die Bildung homogener Schäume der Mehrfachbestimmung eines Bieres verantwortlich. Unabhängig von der Biermenge, welche verschäumt wird, ist das Verhältnis von Gas- und Flüssigkeitsanteil im Schaum deutlich konstanter als es bei offenen Systemen der Fall ist. Durch die bewusste Verteilung der Mehrfachbestimmung über mehrere Tage hinweg zeigt sich, dass eine wesentlich geringere Messwertspreizung auftritt. Durch die zeitliche Streckung des Versuchsprogramms wurde versucht, die sich verändernden Umweltbedingungen über mehrere Tage einzubeziehen.

Die zahlenmäßige Größe der Messwerte wird ausschließlich über die Menge des aufgeschäumten Bieres bestimmt. Mehr oder weniger große Biervolumina zeigen eine sofortige Auswirkung in einem kleineren oder größeren Messwert. Um die Schwankungen, welche sich durch die variierenden Biervolumina ergeben, zu minimieren, wurde eine Durchflussmessung in Form eines induktiven Durchflussmessers eingebaut. Die konstante Dosierung der Biermenge ist für die Messwertkonstanz von elementarer Bedeutung. Kritisch anzumerken sind jedoch die verhältnismäßig hohen Kosten, die durch die verwendete Art der Durchflussmessung verursacht werden.

Aufgrund der Ergebnisse kann gesagt werden, dass die gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nach Ross & Clark wesentlich dadurch mitbestimmt wird, dass das Biervolumen vor der Messung exakt eingeschenkt wird.

Der Grundgedanke der Ur-Konzeption des Messgerätes wurde dahin beibehalten, dass aus einer bestimmten Biermenge ein Bierschaum erzeugt wird, aus dem sich innerhalb zu messender Zeiträume definierte Biervolumina zurückbilden.

Inwieweit die Abweichungen innerhalb der gefundenen Korrelation durch die eine oder andere Messmethodik begründet sind bleibt innerhalb dieser Arbeit ungeklärt.

Es sollte jedoch darauf hingewiesen werden, dass die Schaumdichte völlig unterschiedlich ist und auch die Art des Aufschäumens nicht vergleichbar ist.

Es bilden sich so andere Schäume, deren Zerfallsdynamik sich aus den genannten milieubedingten Einflussfaktoren ebenfalls völlig anders darstellt.

## **9. Ausblick für weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen**

Im Hinblick auf die vorliegende Fertigung der dritten und letzten Ausbaustufe als Prototyp sollte die Herstellung einer Kleinstserie gleicher Geräte erfolgen, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse überprüfen zu können. Dies ist wegen der unterschiedlichen Ergebnisse der Ringversuche mit der Ur-Konzeption des Lg-Foamtesters als vordergründiges Anliegen zu betrachten. Im Zuge dieser Untersuchungen sollten die Geräte der Serie an verschiedenen Orten mit möglichst unterschiedlichen geographischen Gegebenheiten getestet werden.

Die Gestaltung der Düse sollte mit dem Schwerpunkt eines reproduzierbaren Ergebnisses des Aufschäumvorganges einer genauen Betrachtung unterzogen werden. Insbesondere die bisherige Art der Düsenherstellung durch Bohren sollte durch ein Verfahren ersetzt werden, welches die Herstellung homogener Serien gewährleistet.

Ein weiterer hinsichtlich des Aufschäumens zu beobachtender Faktor ist die Anbringung der Düse. Momentan wird das Bier seitlich, im Winkel von 90° zur späteren Schaumsäule eingebracht. Dies verursacht eine Prallströmung am gegenüberliegenden Punkt des Gerätesockels. Es ist zu überprüfen, ob eine Einschäumung in das Gerät von unten erfolgen kann und welche Folgen sich für den entstehenden Schaum ergeben.

Die generelle weitgehende Übereinstimmung mit der bisherigen Referenzmethode nach Ross & Clark wurde über die verschiedenen Modifikationsstufen des Lg-Foamtesters immer wieder gezeigt. Jedoch wurde der grundsätzliche Unterschied zwischen Bieren mit einem CO<sub>2</sub>-Gehalt von rund 5 g/l und Bieren mit einem höheren CO<sub>2</sub>-Gehalt (Biere mit einem hohen Weizenmalzanteil) immer wieder deutlich. Die Klassenbildung erscheint an dieser Stelle nicht nur möglich, sondern auch sinnvoll, da die Schäume, die von den einzelnen Klassen gebildet werden, sich grundsätzlich unterscheiden. Dies kann bereits bei rein visueller Betrachtung festgestellt werden. Eine Begründung für diese Beobachtung kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht gefunden werden. Vermutungen gehen in Richtung des unterschiedlichen Proteinspektrums, wobei nicht nur die Molekulargewichtsverteilung im Blickpunkt stehen sollte. Qualitative Aussagen für die für den Schaum verantwortliche Proteinfractionen sollten getroffen werden können.

Mögliche Unterschiede der physikalischen Eigenschaften zwischen Weizenbieren und anderen könnten ebenfalls zur Ursachenforschung bei den genannten Beobachtungen beitragen.

Die nur mäßige Korrelation der Ergebnisse der Schaumuntersuchung nach Ross & Clark und Lg-Foamtester ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Messung stark unterschiedlicher Schaumsysteme zurückzuführen (Flüssigkeitsanteil). Falls es gelingen kann, die Systeme einander hinsichtlich dieses Parameters anzugleichen besteht die Möglichkeit einer deutlichen Verbesserung der Vergleichbarkeit beider Messverfahren.

## 10. Zusammenfassung

Die Messung des Stabilitätsverhaltens von Bierschaum als einem wichtigen Qualitätsparameter der Brauereitechnologie gewann vor rund 130 Jahren durch die ersten Veröffentlichungen in dieser Richtung an Bedeutung. Verschiedenste Verfahren wurden vorgestellt, wobei sich zwei bisher durchsetzen konnten. Dies sind der Versuchsaufbau nach Ross & Clark mit den Modifikationen von Kolbach und Schilfarth als bisherige Referenzmethode und die weitgehend automatisierte Analyse mittels des NIBEM-Apparates, vorgestellt durch Klopfer.

Die letzte Innovation ist der Lg-Foamtester, welche einer kritischen Betrachtung unterzogen wurde. Einführende Untersuchungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Ergebnisse dieses Messsystems mit der Ross & Clark-Methode zeigen gute Korrelationen im Bereich von Bieren mit einem  $\text{CO}_2$ -Gehalt von rund 5 g/l. Bei Weizenbieren wurde eine deutlich schlechtere Vergleichbarkeit beobachtet.

Die genannten Messverfahren sind durchweg offene Versuchsaufbauten, so dass Milieubedingungen wie Temperatur, absoluter Luftdruck und relative Feuchte einen Einfluss auf das Messergebnis haben. Die Umweltbedingungen tragen maßgeblich zum Ergebnis der Schaummessung bei.

Entsprechende Untersuchungen zur autarken Bestimmung des Schaumverhaltens wurden im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt. Dazu musste ein Gerät geschaffen werden, welches entsprechende Einstellungen möglich macht. Der Aufbau eines aus thermodynamischer Sicht geschlossenen Systems wurde durchgeführt, welches es ermöglicht innerhalb des Probenraums definierte gradientenfreie Bedingungen hinsichtlich Druck, Temperatur, relativer Feuchte und anderem zu schaffen.

Im dieser Vorrichtung (2. Entwicklungsschritt des Lg-Foamtesters) war es möglich, eine Quantifizierung der beiden ersten Einflussgrößen durchzuführen.

Zunächst erfolgte eine Betrachtung des Einflusses eingehender physikalischer Anfangs- und Randbedingungen. Die durch die Probe bestimmten Anfangsbedingungen wie dynamische Viskosität, Dichte und Oberflächenspannung wurden im Hinblick auf die Schaumstabilität untersucht.

Eine Korrelation zwischen der Viskosität und der Bierschaumstabilität kann nicht gezeigt werden. Vielmehr ist es die Oberflächenspannung, welche die Schaumhaltbarkeit maßgeblich beeinflusst. Dies wurde durch den Zusatz von Reinigungsadditiven zur Flaschenreinigung, welche die Oberflächenspannung herabsetzen, verifiziert.

Der Einfluss der apparativen Randbedingungen auf den Aufschäumvorgang, insbesondere die Düsengeometrie und die beschreibenden Strömungskennzahlen

(Reynolds- und Weberzahlen) wurden ermittelt. Es erfolgte die Quantifizierung der Auswirkungen der milieubedingten Randbedingungen Absolutdruck und Temperatur auf das Messergebnis.

Es zeigt sich, dass ein steigender Druck einen negativen Einfluss auf die Schaumstabilität hat, eine steigende Temperatur wirkt sich ebenso aus. Diese Ergebnisse machen deutlich, dass der Aufbau einer geschlossenen Messkammer mit definierten Bedingungen für eine exakte Bestimmung der Bierschaumstabilität von großer Bedeutung ist. Der Lg-Foamtester ermöglicht die Messung des Bierschaumzerfalls in zwei Phasen, Rückbildung von 50 % der aufgeschäumten Biermenge von 164 ml (Phase 1; First Drain) und weiteren 25 % (Phase 2; Half Life-Time). Die untersuchten physikalischen Parameter wirken sich in den beiden Phasen teilweise unterschiedlich aus.

Nach diesen Beobachtungen wurde der Schwerpunkt auf eine entsprechende Geräteentwicklung gesetzt, welche nicht nur die Standardisierung der Bedingungen zum Ziel hatte, sondern ebenso eine bedienerunabhängige, benutzerfreundliche Messapparatur schaffen sollte. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit der Ross & Clark-Methode sollte erhalten bleiben.

Hierzu musste zunächst die Arbeitsweise der Urkonzeption des Lg-Foamtesters erarbeitet werden, da eine Dokumentation aus verschiedenen Gründen nicht vorlag. In der Grundkonstruktion wurde eine Temperaturkompensation vorgesehen, welche ermöglichen sollte, in einem Bereich von 15 bis 25 °C konstante Messwerte zu ermitteln. Die Kompensation arbeitet mit einem direkten Einfluss auf die dosierte Biermenge, was lediglich Probleme bedingt. Mit einer Temperaturkompensation werden im beschriebenen Messbereich keine konstanten Werte erzielt, die Veränderung der dosierten Biermenge verfälscht die gewonnenen Ergebnisse stark. Eine Temperierung der Proben auf eine Solltemperatur von 20 °C, begleitet vom Abschalten der Kompensation, verbessert die Messwertkonstanz deutlich.

Die beschriebene schlechtere Korrelation zu den Messergebnissen nach Ross & Clark bei Weizenbieren wurde zunächst durch das große gebildete Schaumvolumen begründet. Die maximale Schaummenge, welche der Lg-Foamtester in der Messkammer aufnehmen konnte, war auf 600 ml limitiert. Eine Vergrößerung des Messzylinders um 200 ml konnte die Korrelation stark verbessern.

Der entscheidende Fehler ist in der abweichenden Biermenge begründet, bei Volumina oberhalb des maximalen Schaumfassungsvermögens tritt Schaum (Bier) aus dem Zylinder durch den Überlauf aus. Das Messprinzip der Feststellung eines Zeitraumes bis zur Rückbildung bestimmter Biervolumina wird durch eine

Verringerung der Biermenge unterlaufen. Gleiches gilt bei der versuchten Temperaturkompensation.

Als Zwischenergebnis konnte eine konstante Biermenge, die durch die Temperaturkompensation verändert wurde, im Hinblick auf einen sinnvollen Messwert festgehalten werden.

In der letzten Ausbaustufe wurde deshalb auf eine Temperaturkompensation gänzlich verzichtet, auch weil die Temperierung der Proben einen vertretbaren Aufwand darstellt.

Die konstanten Messbedingungen wurden per Definition auf 1100 mbar absolut und 20 °C festgelegt. Mit dieser Druckstufe ist den global auftretenden Extrembedingungen mit einem kleinen Sicherheitszuschlag entsprochen worden. Eine Messtemperatur von 20 °C ist ebenfalls an allen Orten darstellbar.

Die Probleme mit der exakten Volumendosierung, welche in der Grundkonzeption zeitgesteuert realisiert wurde, konnten durch Einsatz eines induktiven Durchflussmessers gelöst werden.

Das Paket aus definierten Bedingungen und reproduzierbaren Biervolumina verbessert die statistische Sicherheit der Messergebnisse deutlich. So konnte die Standardabweichung, Varianz und das Konfidenzintervall um den Mittelwert bei der Messung eines Bieres auf der Grundkonstruktion und der letzten Ausbaustufe um annähernd 50 % reduziert werden. Die Vergleichbarkeit mit der Methode nach Ross & Clark bleibt weitgehend erhalten.

Der in der Arbeit ausgeführte Ansatz einer modifizierten Messwertberechnung durch die Entwicklung von Zerfallskurven kann aufgrund der hohen statistischen Sicherheit der Messwerte und der Wiederholbarkeit der Messwerte als unnötiger Aufwand verworfen werden.

Die programmgesteuerte Bedienung der Neukonstruktion gewährleistet einen minimalen Personalaufwand.

Mit der vorliegenden Gerätentwicklung kann ein deutlicher Beitrag zur Rationalisierung der Laborarbeit hinsichtlich Bierschaumuntersuchung geleistet werden. Eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Messwerte für alle Bierklassen wird gewährleistet.

## 11. Literaturverzeichnis

- 1 Kamm, G.  
Über den Schaum allgemein und den des Bieres  
Brauwelt, **106**, 31/32, 549-555, 1966
- 2 Fath, R.; Sommer, K.  
Physikalische Aspekte der Schaumstabilität  
Mschr. Brauwiss., **38**, 3, 116-120, 1985
- 3 Walker, J.  
Gedanken eines Physikers beim Anblick eines schäumenden  
Bierglases  
Spek. D. Wiss., **2**, 113-117, 1982
- 4 Besner, Hans  
Grenzflächenwechselwirkungen und Mechanismen der  
Schaumstabilisierung beim Aufschäumen von Sahne  
Dissertation TU München, 1997
- 5 Prins, A.  
Principles of foam stability  
Adv. In Food Emulsions and Foams, S. 91-122, 1988
- 6 Bamforth, C. W.  
The foaming properties of beer  
J. Inst. Brew., **91**, 6, 370-383, 1985
- 7 Bohl, Willy  
S. 17-23  
Technische Strömungslehre  
Fachbuchverlag Leipzig
- 8 Senge, B.  
Lehrbriefe für das Hochschulfernstudium  
Technische Strömungsmechanik I  
1. Lehrbrief  
Zentralstelle für das Hochschulfernstudium, Dresden  
2. Ausgabe, 1. Auflage, 1999
- 9 Morris, K. S.  
Foam stability – keeping head on your beer  
Brewing & Distilling International
- 10 Bärwald, G.; Seidel, B.; Loitsch, S.  
Schaumzerfall  
Getränkeindustrie, S. 20-26, 1, 2002
- 11 Burkhardt, L.; Blochwitz, R.; Annemüller, G.  
Gasmischventile für den Einsatz in Schankanlagen  
Brauindustrie, 10, 853-860, 1994
- 12 [www.air-liquide.de](http://www.air-liquide.de)  
2003

- 13      [www.gase.net](http://www.gase.net)  
2003
- 14      [www.linde-gas.de](http://www.linde-gas.de)  
2003
- 15      Eigenschaften der Kohlensäure  
Fachverband Kohlensäure-Industrie e.V.  
S. 16, 3. Auflage Juli 1989
- 16      Vodrazka, Zdenek  
S. 384-386  
Physikalische Chemie  
Verlag Volk und Gesundheit, Berlin, 1979
- 17      Windisch, W.  
Ueber die Schaumbildung und Schaumhaltigkeit des Bieres,  
insbesondere über die Rolle, die die Eiweißkörper hierbei spielen  
Wschr. Br., **13**, 48, 1241-1242, 1896
- 18      Mansfeld, R.  
Das moderne Brauereilaboratorium  
Wschr. Brauerei, **30**, 10, 149-151, 1913
- 19      Fürnrohr, O.  
Zur Schaumhaltigkeit der Biere  
Zschr. f. d. ges. Brauwesen, **36**, 39, 474-475, 1913
- 20      Kremkow, C.  
Methoden zur Messung des Bierschaums – eine Literaturübersicht  
Mschr. Brauerei, 53-56, 1969
- 21      Baker, J.L.; Hulton, E.  
Head retention in beer  
J. Inst. Brew, **27**, 747-771, 1923
- 22      Windisch, W.; Bermann, V.  
Über die Bedingungen für das Schäumen der Bierwürze  
Wo. Br. **37**, 13, 109-111, 1920
- 23      Rask, C.  
Die Schaumprobe zur Beurteilung des Kohlensäuregehaltes und der  
Schaumhaltigkeit des Bieres  
Wo. Br. **42**, 13, 76-77, 1925
- 24      Windisch, W.; Kolbach, P.; Banholzer, W.  
Eine Methode zur quantitativen Bestimmung des Schaumbildungs- und  
Schaumhaltungsvermögens  
Wschr. Brauerei, **42**, 10, 239-240, 1925
- 25      Lüers, H.; Schmal, A.  
Versuche zur Messung der Schaumhaltigkeit nebst einigen  
Anwendungen  
Zschr. Ges. Brauwesen, 48, 10, 59-61, 1925

- 26 Geys, K.  
Über Schaummessungen beim Bier und Faktoren, die den Bierschaum beeinflussen  
Wschr. Brauerei, **43**, 39, 445-450, 1926
- 27 Wieninger, F. M.  
Eine neue Methode zur Schaummessung im Bier  
Wschr. Br., **49**, 35, 273-279, 1932
- 28 Helm, E.  
Ueber eine Methode zur Schaumbestimmung  
Wschr. Br., **50**, 31, 241-243, 1933
- 29 Blom, J.; Prip, P.  
Untersuchungen über Schaum. I.  
Wschr. Br., **53**, 2, 11-13, 1936
- 30 Laufer, S.; Schwarz, R.  
Die Beständigkeit des Bierschaums  
Wschr. Br., **55**, 8, 62-64, 1938
- 31 Ross, S.; Clark, G.L.  
On the measurement of foam stability with special reference to beer  
Wallerstein Lab. Communications, **46**, 6, 46-54, 1939
- 32 Hartong, B. D.  
Über Bierschaum  
Wschr. Br., **58**, 33, 183-186, 1941
- 33 Lienert, H.  
Beitrag zur Schaummessung  
Schweiz. Brauerei-Rdsch., **63**, 10, 171-186, 1952
- 34 Piratzky, W.; Beitner, H.; Jacker, J.; Nispel, B.  
Untersuchungen zur Schaumstabilität des Bieres  
Brauwiss., **8**, 3, 42-50, 1955
- 35 Weiersmüller, P.  
Beitrag zur Methodik der Schaumbestimmung  
Schweiz. Brauerei-Rdsch., **66**, 2, 19-34, 1955
- 36 Rudin, A. D.  
Measurement of the foam stability of beers  
J. Inst. Brew, **63**, 506-509, 1957
- 37 De Clerck, J. ; De Dycker, G.  
Methode zur Bestimmung der Schaumhaltigkeit im Glas  
Brauwelt, **97**, 43/44, 700-703, 1957
- 38 Kipphan, H.; Karakas, C.; Herrmann, J.A.  
Zur Messung der Schaumhaltbarkeit des Bieres nach De Clerck  
Mschr. Brauerei, **21**, 8, 235-238, 1968

- 39 Holmstrom, C. D.; Pollock, G. E.; Ulbricht, J.; McClary, J. E.  
A method for determination of foam adhesion, and the influence of hops  
and hop fractions on this foam property  
ASBC Proceedings, 127-129, 1958
- 40 Glenister, P. R.; Segel, E.  
Foam Evaluation. I. Primary Cling; Secondary Cling; Foam Strength  
ASBC Proceedings, 55-59, 1964
- 41 Rasmussen, J. N.  
Automated analysis of foam stability  
Carlsberg Res. Commun., **46**, 25-36, 1981
- 42 Weyh, H.  
Aussagekraft von Schaumanalysen; Teil 1: NIBEM-Methode  
Mschr. Brauwiss., **41**, 3, 124-128, 1988
- 43 Weyh, H.  
Die Schaumhaltbarkeit nach der Analyse und im Glas  
Mschr. Brauwiss., **40**, 3, 108-117, 1987
- 44 Piendl, A.; Legat, H.  
Zur Funktionsprüfung des Schaumeßgerätes nach Klopfer  
Brauwiss., **33**, 2, 32-37, 1980
- 45 Schuster, K.; Mischke, W.  
Neues zur Schaummessung  
Wschr. Br., **54**, 23, 177-179, 1937
- 46 [www.mir-chem.de](http://www.mir-chem.de)  
2002
- 47 Morris, K. S.  
The stability of foam  
Brewer's Guardian, 11-13, 1984
- 48 Bamforth, C.W.  
Foam: Method, Myth or Magic?  
The Brewer, **10**, 396-399, 1995
- 49 Narziß, L.; Reicheneder, E.; Jogasuria, P.; Eichhorn, P.; Mayer, W.;  
Gommelt, Th.  
Neueste Erkenntnisse zum Thema Bierschaum  
Brauwelt, **42**, 38, 1630-1641, 1988
- 50 Douma, A.; Mocking-Bode, H.; Koolijman, M.; Stolzenbach, E.;  
Orsel, R.; Bekkers, A.; Angelino, S.  
Identification of foam-stabilizing proteins under conditions of normal  
beer dispense and their biochemical and physico-chemical properties  
Proc. EBC, 671-679, 1997

- 51 Krauß, G.; Zürcher, Ch.; Holstein, H.  
Die schaumzerstörende Wirkung einiger Malzlipide und ihr Schicksal im  
Verlaufe des Mälzungs- und Brauprozesses  
Mschr. Brauerei, **25**, 5, 113-122, 1972
- 52 Runkel, U.-D.  
Einfluß von Rohstoffen und Verfahrensbedingungen auf den Schaum  
Mschr. Brau., 29, 6, 248-260, 1976
- 53 Narziß, L.; Röttger, W.  
Bierschaum und Eiweißfraktionen  
Brauwiss, **26**, 9, 261-267, 1973
- 54 Schildbach, R.  
Ertrag contra Qualität bei Braugerste?  
Mschr. Brauerei, **26**, 4, 73-83, 1973
- 55 Bestimmung Gushing verursachender Partikel in Versuchslösungen und  
Bier  
Fischer, S.  
Brauwelt, **141**, 14, 520, 2001
- 56 Marion, D.; Jégou, S.; Douliez, J.-P.; Gaborit, T.; Boivin, P.  
Generation of foaming proteins along the malting and brewing  
processes  
Proc. EBC, 631-638, 2001
- 57 Schilfarth, H.; Sommer, G.; Kremkow, C.  
Kolbachzahl, Malz- und Bierqualität  
Mschr. Brauerei, **23**, 7, 177-186, 1970
- 58 Schild, E.; Lampart, K.  
Der Einfluß des Lösungsgrades der Malzschüttung auf die  
Zusammensetzung des Bieres, insbesondere auf Schaum und  
natürliche Eiweißstabilität  
Brauwiss, **21**, 1, 1-11, 1963
- 59 Narziß, L.  
Probleme des Bierschaumes  
Brauwelt, **108**, 78, 1429-1430, 1968
- 60 [www.foodnews.ch](http://www.foodnews.ch)  
2003
- 61 Curtis, N. S.  
Head and haze – a review  
J. Inst. Brew., **76**, 240-249, 1966
- 62 Suntrup, F.  
Betrachtungen und Untersuchungen im Zusammenhang mit dem  
Bierschaum  
Brauwelt, **106**, 36, 654-664, 1966

- 63 Mändl, B.  
Maßnahmen zur Schaumverbesserung der Biere  
Brauwelt, **106**, 36, 666-670, 1966
- 64 Krauß, G.  
Schaumprobleme  
Mschr. Brauerei, **23**, 2, 26-32, 1970
- 65 Kolbach, P.; Zastrow, K.  
Über den Einfluß des Maischens auf die Schaumhaltbarkeit des Bieres  
Mschr. Brauerei, **16**, 2, 21-33, 1963
- 66 Bamforth, C.W.; Cope, R.  
Original approaches to improving the foam of beer  
EBC Proceedings, 515-521, 1985
- 67 Sommer, G.  
Trials for the optimisation of mashing procedure  
Brauwelt Int., **1**, 23-31, 1986
- 68 Holmstrom, C. D.; Pollock, G. E.; Ulbricht, J.; McClary, J. E.  
A method for determination of foam adhesion, ant the influence of hops  
and hop fractions on this foam property  
ASBC Proceedings, 127-129, 1958
- 69 Narziß, L.; Litzenburger, K.  
Malzqualität, Maischintensität und Gummistoffgehalt  
Brauwiss, **30**, 9, 264-269, 1977
- 70 Unkel, M.  
Der Bierschaum – Erfahrungen aus der Praxis der Betriebsberatung  
Brauwelt, **127**, 12, 467-472, 1987
- 71 Felgenträger, W.  
Numerische Modellierung  
Brauwelt, **142**, 39/40, 1346-1349, 2002
- 72 Einsatz einer Vakuumverdampfungsanlage im Sudhaus der Gilde  
Brauerei AG  
Krottenthaler, M.; Lehmann, J.; Mieth, R.  
Brauwelt, **143**, 30, 953-960, 2003
- 73 Kolbach, P.; Esser, K.-D.  
Ueber den Einfluß des Hopfenkochens auf den Schaum und die  
Eiweißbeständigkeit des Bieres  
III. Einfluß der Kochdauer und der Kochintensität  
Die Brauerei / Wissenschaftliche Beilage, **11**, 221-225, 1958
- 74 Sommer, G.  
Der Einfluß der Gärtemperatur auf die Bierqualität bei der Obergärung  
Mschr. Brauerei, **22**, 183-185, 1969

- 75 Krauß, G.; Sommer, G.  
Versuche zur Abkürzung der Gär- und Lagerzeit bei der Bierherstellung  
Mschr. Brauerei, **20**, 2, 49-75, 1967
- 76 Haboucha, J.; Devreux, A.; Masschelein, C.A.  
Les lipides du mout et leur influence sur la stabilité de la mousse de la  
bière  
Proc. EBC, 451-459, 1981
- 77 Thompson, C. C.; Curtis, N. S. ; Gough, P. ; Ralph, D.  
Factors affecting loss of head retention during top fermentation  
EBC Proceedings, 305, 1965
- 78 Wackerbauer, K.; Beckmann, M.; Cheong, Ch.  
Die Propagation der Hefe  
Brauwelt, **142**, 23/24, 785-797, 2002
- 79 Wackerbauer, K.; Beckmann, M.  
Die Konservierung von Brauereihefen (Teil 2)  
Brauwelt, **142**, 31/32, 1099-1107, 2002
- 80 Narziß, L.  
Bierschaum  
Brauwelt, **38**, 14, 575- 577, 1984
- 81 Reicheneder, E.; Narziß, L.  
Untersuchungen über die Schaumschädigung des Bieres durch  
Hefeproteinasen  
Brauwelt, **127**, 21, 956-961, 1987
- 82 Silbereisen, K.; Kersting, H.-F.  
Über den Einsatz von Bierstabilisierungspräparaten im Brauereibetrieb  
Mschr. Brauerei, **21**, 8, 221-235, 1968
- 83 Weyh, H.  
Einfluß von Bierklärmitteln auf die Schaumstabilität  
Mschr. Brauwiss., **40**, 9, 364-366, 1987
- 84 Curtis, N. S.  
EBC Haze and Foam Group – Preliminary Discussion on Foam  
Brygmesteren, **26**, 4, 101-106, 1969
- 85 Anon.  
Die schäumende Dose  
Brauwelt, **143**, 27, 868-869, 2003
- 86 Steiner, K.; Sonderegger, H.; Bürgin, D.; Länzlinger, U.  
Bierschaum und Bieralter  
Brauerei- und allg. Getr. Rdsch., **99**, 1/2, 2-5, 1988
- 87 Nielsen, H.; Hoybye, -Hansen, I.  
Beeinträchtigung des Bierschaums durch Enzyme der Hefe  
Brauwelt, **128**, 3, 43-47, 1988

- 88 Weyh, H.; Hagen, W.  
Bieralter und Schaumstabilität  
Brauwelt, **135**, 10/11, 513-518, 1995
- 89 US Patentschrift No. 2,943,942  
Eingereicht durch Segel, E.: Siebel Sons' Corporation Chicago, Ill.
- 90 Hoffmann, S.  
Schaumbeeinflussende äußere Parameter  
Brauwelt, **139**, 5, 193-194, 1999
- 91 van Akkeren, F.; Ansems  
Einflussfaktoren auf die Reproduzierbarkeit der  
Schaumhaltbarkeitsanalyse  
EBC-Symposium „Beer Foam Quality“ 26./27. 10. 1999 Amsterdam
- 92 Klopper, W. J.  
Foam stability and foam cling  
EBC Proceedings, 363-371, 1973
- 93 Lienert, H.  
Betrachtungen zur Schaummessung  
Schweiz. Brauerei-Rdsch., 66, 1, 1-18, 1955
- 94 Blom, J.  
Über die Bestimmung der Haltbarkeit des Schaumes  
Proc. EBC, 51-56, 1957
- 95 Physica Meßtechnik GmbH  
Band 3aD Auswertung 1.doc  
Stuttgart
- 96 Krüger, E.; Biegel H.J.  
Betriebs- und Qualitätskontrolle in Brauerei und alkoholfreier  
Getränkeindustrie  
S. 77  
Verlag Paul Parey, Berlin, 1976
- 97 Bierschaum in Prozess erhalten  
Glas, K.  
Brauwelt, **141**, 14, 520, 2001
- 98 PTB-Anforderungen  
Dichte- und Gehaltsmessgeräte – Aräometer  
PTB-A 13.1, S. 6, Dezember 1999
- 99 Kolbach, P.  
Zur Differenzierung der Viskosität von Würze und Bier  
Mschr. Brauerei, 23, 1, 1-5, 1970
- 100 Narziß, L.  
Der Bierschaum – Kenntnisse und Erkenntnisse über ein komplexes  
Problem  
Brauwelt, 31, 29, 1045- 1057, 1978

- 101 Höhn, K.; Issing, E.  
Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Schaumzahl und  
physikalischen Eigenschaften von Bieren  
Brauwiss., 24, 2, 37-42, 1971
- 102 Anger, H.-M.; Glarø, L.; Scholz, M.  
Neues Verfahren zur Messung der Schaumstabilität  
Brauwelt, **141**, 6/7, 224-227, 2001
- 103 Kolbach, P.; Schilfarth, H.  
Zur Methodik der Schaummessung  
Mschr. Brauerei, 6, 6, 61-66, 1953

## **12. Anhang**

**Tabelle zu Abb. 5.1. und 5.2.:**

**Temperaturabhängigkeit der Dichte eines Pilsener Bieres und Hefeweizens**

**Messwerte:**

| Temperatur [°C] | Pilsener | Hefeweizen |
|-----------------|----------|------------|
| 3               | 1,005820 | 1,006900   |
| 5               | 1,007200 | 1,009780   |
| 5               | 1,007220 | 1,009780   |
| 10              | 1,005370 | 1,007830   |
| 10              | 1,005350 | 1,007850   |
| 15              | 1,004240 | 1,007580   |
| 15              | 1,005210 | 1,007420   |
| 15              | 1,004090 |            |
| 15              | 1,005200 |            |
| 20              | 1,005140 | 1,007390   |
| 20              | 1,005140 | 1,007390   |
| 30              | 1,005050 | 1,007480   |
| 30              | 1,005110 | 1,007530   |
| 30              | 1,005090 | 1,007540   |
| 40              | 1,005050 | 1,007260   |
| 40              | 1,005090 | 1,007300   |
| 40              | 1,005070 | 1,007290   |

**Mittelwerte:**

| Temperatur [°C] | Pilsener | Hefeweizen |
|-----------------|----------|------------|
| 3               | 1,005820 | 1,007950   |
| 5               | 1,005570 | 1,007900   |
| 10              | 1,005360 | 1,007840   |
| 15              | 1,005220 | 1,007630   |
| 20              | 1,005140 | 1,007390   |
| 30              | 1,005083 | 1,007350   |
| 40              | 1,005070 | 1,007283   |

**Tabelle zu Abb. 5.3.:  
Viskositätskurve eines Pilsener Bieres**

| Meßpunkt | Scherrate [1/s] | Schubspannung [Pa] | Viskosität [Pa·s] |
|----------|-----------------|--------------------|-------------------|
| 1        | 0,102           | 0,00335            | 0,03300           |
| 2        | 3,550           | 0,01050            | 0,00297           |
| 3        | 6,990           | 0,01810            | 0,00258           |
| 4        | 10,400          | 0,02320            | 0,00222           |
| 5        | 13,900          | 0,02480            | 0,00179           |
| 6        | 17,300          | 0,02330            | 0,00135           |
| 7        | 20,800          | 0,02610            | 0,00126           |
| 8        | 24,200          | 0,04120            | 0,00170           |
| 9        | 27,700          | 0,04750            | 0,00172           |
| 10       | 31,100          | 0,04280            | 0,00138           |
| 11       | 34,600          | 0,05650            | 0,00163           |
| 12       | 38,000          | 0,06130            | 0,00161           |
| 13       | 41,400          | 0,06110            | 0,00148           |
| 14       | 44,900          | 0,07460            | 0,00166           |
| 15       | 48,300          | 0,07130            | 0,00148           |
| 16       | 51,800          | 0,08310            | 0,00161           |
| 17       | 55,200          | 0,08820            | 0,00160           |
| 18       | 58,700          | 0,08710            | 0,00148           |
| 19       | 62,100          | 0,10300            | 0,00165           |
| 20       | 65,600          | 0,10500            | 0,00160           |
| 21       | 69,000          | 0,10200            | 0,00148           |
| 22       | 72,400          | 0,11100            | 0,00154           |
| 23       | 75,900          | 0,12300            | 0,00162           |
| 24       | 79,300          | 0,13000            | 0,00164           |
| 25       | 82,800          | 0,13300            | 0,00161           |
| 26       | 86,200          | 0,13700            | 0,00159           |
| 27       | 89,700          | 0,14200            | 0,00158           |
| 28       | 93,100          | 0,14700            | 0,00158           |
| 29       | 96,600          | 0,15400            | 0,00159           |
| 30       | 100,000         | 0,16100            | 0,00161           |
| 31       | 100,000         | 0,16200            | 0,00162           |
| 32       | 96,600          | 0,15600            | 0,00162           |
| 33       | 93,100          | 0,15000            | 0,00161           |
| 34       | 89,700          | 0,14500            | 0,00161           |
| 35       | 86,200          | 0,14000            | 0,00162           |
| 36       | 82,800          | 0,13500            | 0,00163           |
| 37       | 79,300          | 0,12800            | 0,00161           |
| 38       | 75,900          | 0,11600            | 0,00153           |
| 39       | 72,400          | 0,10800            | 0,00149           |
| 40       | 69,000          | 0,10700            | 0,00156           |
| 41       | 65,600          | 0,10800            | 0,00165           |
| 42       | 62,100          | 0,09370            | 0,00151           |
| 43       | 58,700          | 0,08940            | 0,00152           |
| 44       | 55,200          | 0,09270            | 0,00168           |
| 45       | 51,800          | 0,07460            | 0,00144           |
| 46       | 48,300          | 0,08180            | 0,00169           |
| 47       | 44,900          | 0,06410            | 0,00143           |
| 48       | 41,400          | 0,07190            | 0,00173           |
| 49       | 38,000          | 0,05350            | 0,00141           |
| 50       | 34,500          | 0,05860            | 0,00170           |
| 51       | 31,100          | 0,05110            | 0,00164           |
| 52       | 27,700          | 0,03730            | 0,00135           |
| 53       | 24,200          | 0,03970            | 0,00164           |
| 54       | 20,800          | 0,03950            | 0,00190           |
| 55       | 17,300          | 0,02850            | 0,00164           |
| 56       | 13,900          | 0,01650            | 0,00119           |
| 57       | 10,400          | 0,00999            | 0,00096           |
| 58       | 6,990           | 0,00589            | 0,00084           |
| 59       | 3,540           | 0,00221            | 0,00062           |
| 60       | 0,100           | -0,00499           | -0,04980          |

**Tabelle zu Abb. 5.4.:**  
**Rheogramm eines Pilsener Bieres**

| <b>Pilsener 0 °C</b>  |                                |         | <b>Pilsener 5 °C</b>  |                                |         | <b>Pilsener 10 °C</b> |                                |         |
|-----------------------|--------------------------------|---------|-----------------------|--------------------------------|---------|-----------------------|--------------------------------|---------|
| tau [Pa]              | Gamma-punkt [s <sup>-1</sup> ] |         | tau [Pa]              | Gamma-punkt [s <sup>-1</sup> ] |         | tau [Pa]              | Gamma-punkt [s <sup>-1</sup> ] |         |
|                       | 0,00193                        | 0,100   |                       | 0,00705                        | 0,100   |                       | 0,00478                        | 0,102   |
|                       | 0,01150                        | 3,550   |                       | 0,01920                        | 3,550   |                       | 0,01510                        | 3,550   |
|                       | 0,02160                        | 6,990   |                       | 0,02600                        | 6,990   |                       | 0,02400                        | 6,990   |
|                       | 0,03120                        | 10,400  |                       | 0,03370                        | 10,400  |                       | 0,03340                        | 10,400  |
|                       | 0,04410                        | 13,900  |                       | 0,03860                        | 13,900  |                       | 0,03840                        | 13,900  |
|                       | 0,06280                        | 17,300  |                       | 0,04300                        | 17,300  |                       | 0,04140                        | 17,300  |
|                       | 0,07250                        | 20,800  |                       | 0,05410                        | 20,800  |                       | 0,04360                        | 20,800  |
|                       | 0,07790                        | 24,200  |                       | 0,07220                        | 24,200  |                       | 0,05620                        | 24,200  |
|                       | 0,08600                        | 27,700  |                       | 0,07580                        | 27,700  |                       | 0,06860                        | 27,700  |
|                       | 0,10600                        | 31,100  |                       | 0,07910                        | 31,100  |                       | 0,06740                        | 31,100  |
|                       | 0,11000                        | 34,600  |                       | 0,09790                        | 34,600  |                       | 0,07770                        | 34,600  |
|                       | 0,12100                        | 38,000  |                       | 0,09940                        | 38,000  |                       | 0,08840                        | 38,000  |
|                       | 0,13500                        | 41,400  |                       | 0,11100                        | 41,400  |                       | 0,08820                        | 41,400  |
|                       | 0,14000                        | 44,900  |                       | 0,11900                        | 44,900  |                       | 0,10400                        | 44,900  |
|                       | 0,15700                        | 48,300  |                       | 0,12800                        | 48,300  |                       | 0,10200                        | 48,300  |
|                       | 0,16300                        | 51,800  |                       | 0,13500                        | 51,800  |                       | 0,11700                        | 51,800  |
|                       | 0,17400                        | 55,200  |                       | 0,15000                        | 55,200  |                       | 0,12000                        | 55,200  |
|                       | 0,19000                        | 58,700  |                       | 0,14900                        | 58,700  |                       | 0,12500                        | 58,700  |
|                       | 0,19200                        | 62,100  |                       | 0,16300                        | 62,100  |                       | 0,14100                        | 62,100  |
|                       | 0,20600                        | 65,600  |                       | 0,17500                        | 65,600  |                       | 0,14300                        | 65,600  |
|                       | 0,22200                        | 69,000  |                       | 0,17700                        | 69,000  |                       | 0,14700                        | 69,000  |
|                       | 0,23000                        | 72,400  |                       | 0,18400                        | 72,400  |                       | 0,15800                        | 72,400  |
|                       | 0,23600                        | 75,900  |                       | 0,19700                        | 75,900  |                       | 0,16900                        | 75,900  |
|                       | 0,24500                        | 79,300  |                       | 0,21000                        | 79,300  |                       | 0,17600                        | 79,300  |
|                       | 0,25700                        | 82,800  |                       | 0,21900                        | 82,800  |                       | 0,18200                        | 82,800  |
|                       | 0,26900                        | 86,200  |                       | 0,22700                        | 86,200  |                       | 0,18700                        | 86,200  |
|                       | 0,28000                        | 89,700  |                       | 0,23600                        | 89,700  |                       | 0,19400                        | 89,700  |
|                       | 0,29000                        | 93,100  |                       | 0,24400                        | 93,100  |                       | 0,20100                        | 93,100  |
|                       | 0,30000                        | 96,600  |                       | 0,25300                        | 96,600  |                       | 0,21000                        | 96,600  |
|                       | 0,31000                        | 100,000 |                       | 0,26200                        | 100,000 |                       | 0,21800                        | 100,000 |
| <b>Pilsener 15 °C</b> |                                |         | <b>Pilsener 20 °C</b> |                                |         |                       |                                |         |
| tau [Pa]              | Gamma-punkt [s <sup>-1</sup> ] |         | tau [Pa]              | Gamma-punkt [s <sup>-1</sup> ] |         |                       |                                |         |
|                       | 0,00100                        | 0,102   |                       | 0,00335                        | 0,102   |                       |                                |         |
|                       | 0,00411                        | 3,550   |                       | 0,01050                        | 3,550   |                       |                                |         |
|                       | 0,01090                        | 6,990   |                       | 0,01810                        | 6,990   |                       |                                |         |
|                       | 0,02360                        | 10,400  |                       | 0,02320                        | 10,400  |                       |                                |         |
|                       | 0,03340                        | 13,900  |                       | 0,02480                        | 13,900  |                       |                                |         |
|                       | 0,03640                        | 17,300  |                       | 0,02330                        | 17,300  |                       |                                |         |
|                       | 0,03590                        | 20,800  |                       | 0,02610                        | 20,800  |                       |                                |         |
|                       | 0,03980                        | 24,200  |                       | 0,04120                        | 24,200  |                       |                                |         |
|                       | 0,05700                        | 27,700  |                       | 0,04750                        | 27,700  |                       |                                |         |
|                       | 0,05850                        | 31,100  |                       | 0,04280                        | 31,100  |                       |                                |         |
|                       | 0,05850                        | 34,600  |                       | 0,05650                        | 34,600  |                       |                                |         |
|                       | 0,07640                        | 38,000  |                       | 0,06130                        | 38,000  |                       |                                |         |
|                       | 0,07120                        | 41,400  |                       | 0,06110                        | 41,400  |                       |                                |         |
|                       | 0,08870                        | 44,900  |                       | 0,07460                        | 44,900  |                       |                                |         |
|                       | 0,08410                        | 48,300  |                       | 0,07130                        | 48,300  |                       |                                |         |
|                       | 0,10100                        | 51,800  |                       | 0,08310                        | 51,800  |                       |                                |         |
|                       | 0,09660                        | 55,200  |                       | 0,08820                        | 55,200  |                       |                                |         |
|                       | 0,10900                        | 58,700  |                       | 0,08710                        | 58,700  |                       |                                |         |
|                       | 0,11800                        | 62,100  |                       | 0,10300                        | 62,100  |                       |                                |         |
|                       | 0,11500                        | 65,600  |                       | 0,10500                        | 65,600  |                       |                                |         |
|                       | 0,12500                        | 69,000  |                       | 0,10200                        | 69,000  |                       |                                |         |
|                       | 0,13700                        | 72,400  |                       | 0,11100                        | 72,400  |                       |                                |         |
|                       | 0,14400                        | 75,900  |                       | 0,12300                        | 75,900  |                       |                                |         |
|                       | 0,14600                        | 79,300  |                       | 0,13000                        | 79,300  |                       |                                |         |
|                       | 0,14900                        | 82,800  |                       | 0,13300                        | 82,800  |                       |                                |         |
|                       | 0,15400                        | 86,200  |                       | 0,13700                        | 86,200  |                       |                                |         |
|                       | 0,16000                        | 89,700  |                       | 0,14200                        | 89,700  |                       |                                |         |
|                       | 0,16700                        | 93,100  |                       | 0,14700                        | 93,100  |                       |                                |         |
|                       | 0,17400                        | 96,600  |                       | 0,15400                        | 96,600  |                       |                                |         |
|                       | 0,18200                        | 100,000 |                       | 0,16100                        | 100,000 |                       |                                |         |

**Tabelle zu Abb. 5.5.:  
Rheogramm eines Hefeweizenbieres**

| Hefeweizen 0 °C  |                                |  | Hefeweizen 5 °C  |                                |  | Hefeweizen 10 °C |                                |  |
|------------------|--------------------------------|--|------------------|--------------------------------|--|------------------|--------------------------------|--|
| tau [Pa]         | Gamma-punkt [s <sup>-1</sup> ] |  | tau              | Gamma-punkt [s <sup>-1</sup> ] |  | tau              | Gamma-punkt [s <sup>-1</sup> ] |  |
| 0,00100          | 0,1020                         |  | 0,00100          | 0,0998                         |  | 0,00100          | 0,1000                         |  |
| 0,00958          | 3,5500                         |  | 0,01470          | 3,5500                         |  | 0,00612          | 3,5500                         |  |
| 0,01830          | 6,9900                         |  | 0,02760          | 6,9900                         |  | 0,02150          | 6,9900                         |  |
| 0,02790          | 10,4000                        |  | 0,03910          | 10,4000                        |  | 0,02770          | 10,4000                        |  |
| 0,04560          | 13,9000                        |  | 0,04650          | 13,9000                        |  | 0,04070          | 13,9000                        |  |
| 0,06650          | 17,3000                        |  | 0,05050          | 17,3000                        |  | 0,04470          | 17,3000                        |  |
| 0,07920          | 20,8000                        |  | 0,05370          | 20,8000                        |  | 0,04540          | 20,8000                        |  |
| 0,08270          | 24,2000                        |  | 0,07020          | 24,2000                        |  | 0,05500          | 24,2000                        |  |
| 0,09580          | 27,7000                        |  | 0,08760          | 27,7000                        |  | 0,07320          | 27,7000                        |  |
| 0,11900          | 31,1000                        |  | 0,08730          | 31,1000                        |  | 0,07630          | 31,1000                        |  |
| 0,12200          | 34,6000                        |  | 0,10300          | 34,6000                        |  | 0,07860          | 34,6000                        |  |
| 0,13300          | 38,0000                        |  | 0,11100          | 38,0000                        |  | 0,09900          | 38,0000                        |  |
| 0,15400          | 41,4000                        |  | 0,11600          | 41,4000                        |  | 0,09330          | 41,4000                        |  |
| 0,15700          | 44,9000                        |  | 0,13700          | 44,9000                        |  | 0,11400          | 44,9000                        |  |
| 0,17700          | 48,3000                        |  | 0,13700          | 48,3000                        |  | 0,11300          | 48,3000                        |  |
| 0,18600          | 51,8000                        |  | 0,15300          | 51,8000                        |  | 0,13100          | 51,8000                        |  |
| 0,19700          | 55,2000                        |  | 0,16100          | 55,2000                        |  | 0,13000          | 55,2000                        |  |
| 0,21600          | 58,7000                        |  | 0,16900          | 58,7000                        |  | 0,14400          | 58,7000                        |  |
| 0,21800          | 62,1000                        |  | 0,18900          | 62,1000                        |  | 0,15400          | 62,1000                        |  |
| 0,23400          | 65,6000                        |  | 0,19100          | 65,6000                        |  | 0,15400          | 65,6000                        |  |
| 0,25400          | 69,0000                        |  | 0,19600          | 69,0000                        |  | 0,16400          | 69,0000                        |  |
| 0,26100          | 72,4000                        |  | 0,21200          | 72,4000                        |  | 0,18000          | 72,4000                        |  |
| 0,26900          | 75,9000                        |  | 0,22500          | 75,9000                        |  | 0,19100          | 75,9000                        |  |
| 0,27800          | 79,3000                        |  | 0,23800          | 79,3000                        |  | 0,19300          | 79,3000                        |  |
| 0,29200          | 82,8000                        |  | 0,24500          | 82,8000                        |  | 0,20000          | 82,8000                        |  |
| 0,30500          | 86,2000                        |  | 0,25500          | 86,2000                        |  | 0,20300          | 86,2000                        |  |
| 0,32100          | 89,7000                        |  | 0,26000          | 89,7000                        |  | 0,21200          | 89,7000                        |  |
| 0,33100          | 93,1000                        |  | 0,27100          | 93,1000                        |  | 0,22300          | 93,1000                        |  |
| 0,34100          | 96,6000                        |  | 0,28500          | 96,6000                        |  | 0,23200          | 96,6000                        |  |
| 0,35400          | 100,0000                       |  | 0,29800          | 100,0000                       |  | 0,24100          | 100,0000                       |  |
| Hefeweizen 15 °C |                                |  | Hefeweizen 20 °C |                                |  |                  |                                |  |
| tau              | Gamma-punkt [s <sup>-1</sup> ] |  | tau              | Gamma-punkt [s <sup>-1</sup> ] |  |                  |                                |  |
| 0,00100          | 0,1000                         |  | 0,00100          | 0,1020                         |  |                  |                                |  |
| 0,00109          | 3,5500                         |  | 0,00324          | 3,5500                         |  |                  |                                |  |
| 0,00327          | 6,9900                         |  | 0,00100          | 6,9900                         |  |                  |                                |  |
| 0,01640          | 10,4000                        |  | 0,02330          | 10,4000                        |  |                  |                                |  |
| 0,02930          | 13,9000                        |  | 0,03330          | 13,9000                        |  |                  |                                |  |
| 0,04240          | 17,3000                        |  | 0,03200          | 17,3000                        |  |                  |                                |  |
| 0,04490          | 20,8000                        |  | 0,02990          | 20,8000                        |  |                  |                                |  |
| 0,04360          | 24,2000                        |  | 0,03930          | 24,2000                        |  |                  |                                |  |
| 0,05510          | 27,7000                        |  | 0,05430          | 27,7000                        |  |                  |                                |  |
| 0,07210          | 31,1000                        |  | 0,05160          | 31,1000                        |  |                  |                                |  |
| 0,06530          | 34,6000                        |  | 0,05740          | 34,6000                        |  |                  |                                |  |
| 0,08200          | 38,0000                        |  | 0,07330          | 38,0000                        |  |                  |                                |  |
| 0,08590          | 41,4000                        |  | 0,06480          | 41,4000                        |  |                  |                                |  |
| 0,08810          | 44,9000                        |  | 0,08610          | 44,9000                        |  |                  |                                |  |
| 0,09940          | 48,3000                        |  | 0,07550          | 48,3000                        |  |                  |                                |  |
| 0,10700          | 51,8000                        |  | 0,09640          | 51,8000                        |  |                  |                                |  |
| 0,10600          | 55,2000                        |  | 0,09280          | 55,2000                        |  |                  |                                |  |
| 0,12600          | 58,7000                        |  | 0,10200          | 58,7000                        |  |                  |                                |  |
| 0,12400          | 62,1000                        |  | 0,11500          | 62,1000                        |  |                  |                                |  |
| 0,12900          | 65,6000                        |  | 0,10900          | 65,6000                        |  |                  |                                |  |
| 0,14500          | 69,0000                        |  | 0,11800          | 69,0000                        |  |                  |                                |  |
| 0,15100          | 72,4000                        |  | 0,12900          | 72,4000                        |  |                  |                                |  |
| 0,15600          | 75,9000                        |  | 0,13800          | 75,9000                        |  |                  |                                |  |
| 0,15700          | 79,3000                        |  | 0,14400          | 79,3000                        |  |                  |                                |  |
| 0,16500          | 82,8000                        |  | 0,14500          | 82,8000                        |  |                  |                                |  |
| 0,17200          | 86,2000                        |  | 0,14700          | 86,2000                        |  |                  |                                |  |
| 0,17700          | 89,7000                        |  | 0,15200          | 89,7000                        |  |                  |                                |  |
| 0,18700          | 93,1000                        |  | 0,16000          | 93,1000                        |  |                  |                                |  |
| 0,19200          | 96,6000                        |  | 0,16800          | 96,6000                        |  |                  |                                |  |
| 0,19800          | 100,0000                       |  | 0,17500          | 100,0000                       |  |                  |                                |  |

**Tabelle zu Abb. 5.6.:**

**Dynamische Viskosität in Abhängigkeit von der Scherrate (Pilsener Bier)**

| Scherrate [ $s^{-1}$ ] | Pilsener 0 °C | Pilsener 5 °C | Pilsener 10 °C | Pilsener 15 °C | Pilsener 20 °C |
|------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| 20,8                   | 0,00349       | 0,00260       | 0,0021         | 0,00173        | 0,00126        |
| 24,2                   | 0,00322       | 0,00298       | 0,00232        | 0,00164        | 0,00170        |
| 27,7                   | 0,00311       | 0,00274       | 0,00248        | 0,00206        | 0,00172        |
| 31,1                   | 0,00342       | 0,00254       | 0,00217        | 0,00188        | 0,00138        |
| 34,6                   | 0,00319       | 0,00283       | 0,00225        | 0,00169        | 0,00163        |
| 38,0                   | 0,00317       | 0,00262       | 0,00233        | 0,00201        | 0,00161        |
| 41,4                   | 0,00325       | 0,00267       | 0,00213        | 0,00172        | 0,00148        |
| 44,9                   | 0,00311       | 0,00265       | 0,00232        | 0,00198        | 0,00166        |
| 48,3                   | 0,00324       | 0,00264       | 0,00211        | 0,00174        | 0,00148        |
| 51,8                   | 0,00315       | 0,00261       | 0,00225        | 0,00196        | 0,00161        |
| 55,2                   | 0,00315       | 0,00271       | 0,00218        | 0,00175        | 0,00160        |
| 58,7                   | 0,00325       | 0,00254       | 0,00214        | 0,00186        | 0,00148        |
| 62,1                   | 0,00310       | 0,00263       | 0,00227        | 0,00190        | 0,00165        |
| 65,6                   | 0,00314       | 0,00267       | 0,00218        | 0,00175        | 0,00160        |
| 69,0                   | 0,00321       | 0,00256       | 0,00213        | 0,00181        | 0,00148        |
| 72,4                   | 0,00318       | 0,00254       | 0,00218        | 0,00189        | 0,00154        |
| 75,9                   | 0,00311       | 0,00260       | 0,00222        | 0,00190        | 0,00162        |
| 79,3                   | 0,00309       | 0,00264       | 0,00222        | 0,00185        | 0,00164        |
| 82,8                   | 0,00310       | 0,00265       | 0,00219        | 0,00180        | 0,00161        |
| 86,2                   | 0,00312       | 0,00263       | 0,00217        | 0,00178        | 0,00159        |
| 89,7                   | 0,00312       | 0,00263       | 0,00216        | 0,00179        | 0,00158        |
| 93,1                   | 0,00312       | 0,00262       | 0,00216        | 0,00179        | 0,00158        |
| 96,6                   | 0,00311       | 0,00262       | 0,00217        | 0,00180        | 0,00159        |
| 100,0                  | 0,00310       | 0,00262       | 0,00218        | 0,00182        | 0,00161        |

**Tabelle zu Abb. 5.7.:**

**Dynamische Viskosität in Abhängigkeit von der Scherrate (Hefeweizen)**

| Scherrate [ $s^{-1}$ ] | Hefeweizen 0 °C | Hefeweizen 5 °C | Hefeweizen 10 °C | Hefeweizen 15 °C | Hefeweizen 20 °C |
|------------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| 20,8                   | 0,00381         | 0,00259         | 0,00218          | 0,00216          | 0,00144          |
| 24,2                   | 0,00341         | 0,00290         | 0,00227          | 0,00180          | 0,00162          |
| 27,7                   | 0,00346         | 0,00317         | 0,00265          | 0,00199          | 0,00196          |
| 31,1                   | 0,00383         | 0,00281         | 0,00245          | 0,00232          | 0,00166          |
| 34,6                   | 0,00352         | 0,00297         | 0,00228          | 0,00189          | 0,00166          |
| 38,0                   | 0,00350         | 0,00293         | 0,00260          | 0,00216          | 0,00193          |
| 41,4                   | 0,00371         | 0,00280         | 0,00225          | 0,00207          | 0,00156          |
| 44,9                   | 0,00350         | 0,00304         | 0,00255          | 0,00196          | 0,00192          |
| 48,3                   | 0,00367         | 0,00283         | 0,00233          | 0,00206          | 0,00156          |
| 51,8                   | 0,00358         | 0,00295         | 0,00252          | 0,00207          | 0,00186          |
| 55,2                   | 0,00356         | 0,00291         | 0,00236          | 0,00193          | 0,00168          |
| 58,7                   | 0,00368         | 0,00288         | 0,00246          | 0,00215          | 0,00174          |
| 62,1                   | 0,00351         | 0,00304         | 0,00248          | 0,00200          | 0,00185          |
| 65,6                   | 0,00357         | 0,00291         | 0,00234          | 0,00197          | 0,00166          |
| 69,0                   | 0,00368         | 0,00284         | 0,00238          | 0,00209          | 0,00171          |
| 72,4                   | 0,00360         | 0,00293         | 0,00248          | 0,00208          | 0,00178          |
| 75,9                   | 0,00355         | 0,00296         | 0,00252          | 0,00206          | 0,00181          |
| 79,3                   | 0,00350         | 0,00300         | 0,00243          | 0,00198          | 0,00181          |
| 82,8                   | 0,00352         | 0,00295         | 0,00242          | 0,00199          | 0,00175          |
| 86,2                   | 0,00354         | 0,00296         | 0,00235          | 0,00200          | 0,00171          |
| 89,7                   | 0,00357         | 0,00290         | 0,00237          | 0,00197          | 0,00170          |
| 93,1                   | 0,00356         | 0,00291         | 0,00239          | 0,00201          | 0,00172          |
| 96,6                   | 0,00353         | 0,00295         | 0,00240          | 0,00199          | 0,00174          |
| 100,0                  | 0,00354         | 0,00298         | 0,00241          | 0,00198          | 0,00175          |

**Tabelle zu Abb. 5.8.:****Graphische Auswertung zur Ermittlung des Fließgesetzes nach Frenkel-Eyring (Pilsener)**

| t [°C] | T [K]  | 1/T         | eta, gemessen [Pas] | ln eta     | Steigung/T   | exp Steigung/T | eta, errechnet [Pas] |
|--------|--------|-------------|---------------------|------------|--------------|----------------|----------------------|
| 0      | 273,15 | 0,003660992 | 0,00318707245       | -5,7486525 | 10,539264141 | 37769,76299    | 0,003183622          |
| 5      | 278,15 | 0,003595182 | 0,00263412730       | -5,9392033 | 10,349811253 | 31251,14370    | 0,002634166          |
| 10     | 283,15 | 0,003531697 | 0,00219376060       | -6,1221380 | 10,167049267 | 26031,15235    | 0,002194172          |
| 15     | 288,15 | 0,003470415 | 0,00182279070       | -6,3073866 | 9,990629880  | 21821,03911    | 0,0018393            |
| 20     | 293,15 | 0,003411223 | 0,00156013700       | -6,4629816 | 9,820228552  | 18402,25613    | 0,00155113           |

Steigung der Regressionsgeraden:

2878,8

Achsenabstand der Regressionsgeraden:

-16,289

Stoffkonstante [Pas]:

8,42902E-08

Fließaktivierungsenergie [J/mol]:

23935

**Tabelle zu Abb. 5.9.:****Graphische Auswertung zur Ermittlung des Fließgesetzes nach Frenkel-Eyring (Hefeweizen)**

| t [°C] | T [K]  | 1/T         | eta, gemessen [Pas] | ln eta       | Steigung/T  | exp Steigung/T | eta, errechnet [Pas] |
|--------|--------|-------------|---------------------|--------------|-------------|----------------|----------------------|
| 0      | 273,15 | 0,003660992 | 0,00375714          | -5,584097169 | 11,25388980 | 77179,54997    | 0,003653352          |
| 5      | 278,15 | 0,003595182 | 0,002911291         | -5,839158654 | 11,05159087 | 63044,16984    | 0,002984243          |
| 10     | 283,15 | 0,003531697 | 0,002408739         | -6,028651988 | 10,85643652 | 51866,92163    | 0,00245516           |
| 20     | 293,15 | 0,003411223 | 0,001724125         | -6,36303543  | 10,48609927 | 35814,18298    | 0,001695291          |

Steigung der Regressionsgeraden:

3074

Achsenabstand der Regressionsgeraden:

-16,866

Stoffkonstante [Pas]:

4,73358E-08

Fließaktivierungsenergie [J/mol]:

25558

**Tabelle zu Abb. 5.10. und 5.11.:**  
**Vergleich der errechneten und gemessenen dynamischen Viskosität**  
**bei steigender Temperatur (Pilsener und Hefeweizen)**

| <b>Pilsener</b> |                                        |                                       |  |
|-----------------|----------------------------------------|---------------------------------------|--|
| T [K]           | errechnete dynamische Viskosität [Pas] | gemessene dynamische Viskosität [Pas] |  |
| 273             | 0,003183622                            | 0,00318707245                         |  |
| 278             | 0,002634166                            | 0,00263412730                         |  |
| 283             | 0,002194172                            | 0,00219376060                         |  |
| 288             | 0,0018393                              | 0,00182279070                         |  |
| 293             | 0,00155113                             | 0,00156013700                         |  |

| <b>Hefeweizen</b> |                                        |                                       |  |
|-------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|--|
| T [K]             | errechnete dynamische Viskosität [Pas] | gemessene dynamische Viskosität [Pas] |  |
| 273               | 0,003653352                            | 0,00375714                            |  |
| 278               | 0,002984243                            | 0,002911291                           |  |
| 283               | 0,00245516                             | 0,002408739                           |  |
| 293               | 0,001695291                            | 0,001724125                           |  |

**Tabelle zu Abb. 5.12.:**  
**Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung**

| Pilsener                   |      |       |       |       |      |
|----------------------------|------|-------|-------|-------|------|
| Oberflächenspannung [mN/m] |      |       |       |       |      |
| 0 °C                       | 5 °C | 10 °C | 15 °C | 20 °C |      |
|                            | 47,5 | 43,7  | 44,2  | 43,2  | 42,5 |
|                            | 47,3 | 44,2  | 43,8  | 43,2  | 42,6 |
|                            | 47,8 | 44,5  | 44,3  | 43,3  | 42,5 |
|                            | 47,5 | 44,4  | 44,0  | 43,1  | 42,7 |
|                            | 47,5 | 44,3  | 44,1  | 43,2  | 42,6 |
|                            |      | 44,6  |       |       | 42,5 |

| Hefeweizen                 |      |       |       |       |      |
|----------------------------|------|-------|-------|-------|------|
| Oberflächenspannung [mN/m] |      |       |       |       |      |
| 0 °C                       | 5 °C | 10 °C | 15 °C | 20 °C |      |
|                            | 45,0 | 44,2  | 43,5  | 43,8  | 41,1 |
|                            | 44,5 | 43,8  | 43,8  | 43,3  | 40,9 |
|                            | 45,1 | 44,9  | 43,9  | 43,0  | 41,7 |
|                            | 45,4 | 44,8  | 43,8  | 44,0  | 42,5 |
|                            | 46,0 | 44,2  | 43,7  | 44,0  | 43,3 |
|                            | 46,1 | 44,4  |       | 43,8  | 42,4 |

| Rohwerte als Mittelwert der 5 bzw. 6 Messwerte: |          |            |  |
|-------------------------------------------------|----------|------------|--|
| Oberflächenspannung [mN/m]                      |          |            |  |
| t [°C]                                          | Pilsener | Hefeweizen |  |
| 0                                               | 47,52    | 45,35      |  |
| 5                                               | 44,28    | 44,38      |  |
| 10                                              | 44,08    | 43,74      |  |
| 15                                              | 43,20    | 43,65      |  |
| 20                                              | 42,57    | 41,98      |  |

Oberflächenspannung von dest. Wasser: 72,8 mN/m

Messwert für Wasser: 66,6 mN/m

**Korrekturfaktor: 1,093**

| Korrigierte Mittelwerte:   |          |            |  |
|----------------------------|----------|------------|--|
| Oberflächenspannung [mN/m] |          |            |  |
| t [°C]                     | Pilsener | Hefeweizen |  |
| 0                          | 51,94    | 49,57      |  |
| 5                          | 48,40    | 48,51      |  |
| 10                         | 48,18    | 47,81      |  |
| 15                         | 47,22    | 47,71      |  |
| 20                         | 46,53    | 45,89      |  |

**Tabelle zu Abb. 5.13.:**  
**Einfluss oberflächenaktiver Substanzen auf die Schaumstabilität**

| Dosierung Mix 250 [ppm] | First Drain [s] | Half Life-Time [s] | Schaumvolumen [ml] |
|-------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Nullbier                | 167             | 112                | 480                |
| 0,1                     | 165             | 112                | 470                |
| 1                       | 163             | 112                | 470                |
| 10                      | 161             | 109                | 470                |
| 20                      | 153             | 99                 | 500                |
| 50                      | 113             | 62                 | 490                |
| 100                     | 106             | 47                 | 470                |

**Tabelle zu Abb. 5.14.:  
Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung**

|       | Pilsener | Hefeweizen |
|-------|----------|------------|
| 0 °C  | 47,5     | 45,0       |
|       | 47,3     | 44,5       |
|       | 47,8     | 45,1       |
|       | 47,5     | 45,4       |
|       | 47,5     | 46,0       |
|       |          | 46,1       |
| 5 °C  | 43,7     | 44,2       |
|       | 44,2     | 43,8       |
|       | 44,5     | 44,9       |
|       | 44,4     | 44,8       |
|       | 44,3     | 44,2       |
|       | 44,6     | 44,4       |
| 10 °C | 44,2     | 43,5       |
|       | 43,8     | 43,8       |
|       | 44,3     | 43,9       |
|       | 44,0     | 43,8       |
|       | 44,1     | 43,7       |
| 15 °C | 43,2     | 43,8       |
|       | 43,2     | 43,3       |
|       | 43,3     | 43,0       |
|       | 43,1     | 44,0       |
|       | 43,2     | 44,0       |
|       |          | 43,8       |
| 20 °C | 42,5     | 41,1       |
|       | 42,6     | 40,9       |
|       | 42,5     | 41,7       |
|       | 42,7     | 42,5       |
|       | 42,6     | 43,3       |
|       | 42,5     | 42,4       |

| Mittelwerte der Einzelmessungen |          |            |
|---------------------------------|----------|------------|
| t [°C]                          | Pilsener | Hefeweizen |
| 0                               | 47,52    | 45,35      |
| 5                               | 44,28    | 44,38      |
| 10                              | 44,08    | 43,74      |
| 15                              | 43,20    | 43,65      |
| 20                              | 42,57    | 41,98      |

| Korrigierte Werte |          |            |
|-------------------|----------|------------|
| t [°C]            | Pilsener | Hefeweizen |
| 0                 | 51,94    | 49,57      |
| 5                 | 49,80    | 48,51      |
| 10                | 48,18    | 47,81      |
| 15                | 47,22    | 47,71      |
| 20                | 46,53    | 45,89      |

**Korrekturfaktor** **1,093**

**Tabelle zu Abb. 5.15.:**

**Korrelation zwischen Ross & Clark und Half Life-Time Lg-Foamtester**

| Probennummer | R & C | Mittelwert Lg | 1. Probe | 2. Probe | Probennummer | R & C | Mittelwert Lg | 1. Probe | 2. Probe |
|--------------|-------|---------------|----------|----------|--------------|-------|---------------|----------|----------|
| 1 a          | 120   | 113,5         | 113      | 114      | 54 a         | 119   | 106,0         | 106      | 106      |
| 1 b          | 124   | 120,0         | 120      | 120      | 54 b         | 116   | 106,5         | 106      | 107      |
| 2 a          | 119   | 106,0         | 106      | 106      | 55 a         | 119   | 108,0         | 109      | 107      |
| 2 b          | 124   | 119,0         | 119      | 119      | 55 b         | 123   | 110,0         | 110      | 110      |
| 3 a          | 112   | 113,0         | 113      | 113      | 56 a         | 122   | 147,5         | 148      | 147      |
| 3 b          | 116   | 110,5         | 115      | 106      | 56 b         | 117   | 205,5         | 204      | 207      |
| 4 a          | 116   | 113,0         | 113      | 113      | 57 a         | 98    | 171,5         | 136      | 207      |
| 4 b          | 115   | 102,0         | 102      | 102      | 58 a         | 129   | 109,5         | 110      | 109      |
| 6 a          | 116   | 113,0         | 113      | 113      | 58 b         | 109   | 104,0         | 104      | 104      |
| 6 b          | 115   | 114,5         | 115      | 114      | 59 a         | 127   | 111,0         | 111      | 111      |
| 7 a          | 124   | 130,0         | 127      | 133      | 59 b         | 109   | 99,0          | 99       | 99       |
| 7 b          | 132   | 137,0         | 137      | 137      | 61 a         | 96    | 92,0          | 93       | 91       |
| 8 a          | 130   | 149,0         | 149      | 149      | 61 b         | 102   | 97,5          | 98       | 97       |
| 8 b          | 130   | 141,0         | 141      | 141      | 62 a         | 113   | 102,0         | 101      | 103      |
| 9 a          | 108   | 107,5         | 107      | 108      | 62 b         | 110   | 116,5         | 116      | 117      |
| 9 b          | 107   | 101,0         | 99       | 103      | 63 a         | 120   | 113,5         | 114      | 113      |
| 12 a         | 97    | 225,0         | 224      | 226      | 63 b         | 130   | 135,0         | 135      | 135      |
| 12 b         | 99    | 108,5         | 108      | 109      | 64 a         | 127   | 132,0         | 132      | 132      |
| 14 a         | 122   | 117,0         | 116      | 118      | 64 b         | 128   | 130,5         | 129      | 132      |
| 14 b         | 122   | 108,0         | 111      | 105      | 65 a         | 134   | 122,0         | 121      | 123      |
| 15 a         | 128   | 122,0         | 121      | 123      | 65 b         | 130   | 113,0         | 116      | 110      |
| 15 b         | 128   | 112,5         | 113      | 112      | 67 a         | 126   | 121,0         | 120      | 122      |
| 17 a         | 130   | 124,0         | 124      | 124      | 67 b         | 126   | 135,0         | 137      | 133      |
| 17 b         | 132   | 120,0         | 120      | 120      | 68 a         | 122   | 107,5         | 108      | 107      |
| 18 a         | 118   | 116,0         | 116      | 116      | 68 b         | 128   | 112,0         | 112      | 112      |
| 18 b         | 125   | 120,0         | 120      | 120      | 69 a         | 114   | 114,0         | 114      | 114      |
| 19 a         | 115   | 119,0         | 119      | 119      | 69 b         | 120   | 120,0         | 120      | 120      |
| 19 b         | 118   | 119,0         | 119      | 119      | 70 a         | 116   | 107,0         | 107      | 107      |
| 21 a         | 119   | 114,0         | 114      | 114      | 70 b         | 119   | 110,0         | 110      | 110      |
| 21 b         | 123   | 119,0         | 119      | 119      | 71 a         | 113   | 114,5         | 115      | 114      |
| 23 a         | 121   | 118,5         | 118      | 119      | 71 b         | 117   | 109,0         | 109      | 109      |
| 23 b         | 119   | 96,0          | 96       | 96       | 72 a         | 121   | 112,5         | 112      | 113      |
| 24 a         | 132   | 124,0         | 123      | 125      | 72 b         | 129   | 112,0         | 112      | 112      |
| 24 b         | 127   | 100,0         | 99       | 101      | 73 a         | 118   | 102,5         | 103      | 102      |
| 25 a         | 127   | 116,0         | 116      | 116      | 73 b         | 130   | 113,0         | 114      | 112      |
| 25 b         | 125   | 122,0         | 122      | 122      | 74 a         | 122   | 116,0         | 117      | 115      |
| 27 a         | 125   | 113,5         | 113      | 114      | 74 b         | 116   | 108,0         | 108      | 108      |
| 27 b         | 130   | 113,0         | 113      | 113      | 76 a         | 122   | 113,0         | 113      | 113      |
| 28 a         | 119   | 118,5         | 118      | 119      | 76 b         | 114   | 106,0         | 106      | 106      |
| 28 b         | 122   | 108,5         | 109      | 108      | 77 a         | 116   | 107,5         | 108      | 107      |
| 29 a         | 126   | 114,5         | 114      | 115      | 77 b         | 118   | 108,0         | 108      | 108      |
| 29 b         | 121   | 105,5         | 106      | 105      | 78 a         | 119   | 107,0         | 107      | 107      |
| 30 a         | 122   | 117,0         | 117      | 117      | 78 b         | 124   | 111,5         | 111      | 112      |
| 30 b         | 121   | 105,5         | 106      | 105      | 79 a         | 124   | 109,0         | 109      | 109      |
| 31 a         | 127   | 127,5         | 126      | 129      | 79 b         | 127   | 112,5         | 112      | 113      |
| 31 b         | 128   | 109,5         | 109      | 110      | 81 a         | 120   | 110,5         | 109      | 112      |
| 32 a         | 120   | 112,0         | 112      | 112      | 81 b         | 118   | 108,5         | 108      | 109      |
| 32 b         | 125   | 109,5         | 109      | 110      | 82 a         | 115   | 104,5         | 104      | 105      |
| 33 a         | 122   | 112,0         | 112      | 112      | 82 b         | 128   | 107,5         | 107      | 108      |
| 33 b         | 133   | 114,0         | 114      | 114      | 83 a         | 101   | 98,5          | 98       | 99       |
| 34 a         | 115   | 114,0         | 114      | 114      | 83 b         | 132   | 112,0         | 112      | 112      |
| 34 b         | 111   | 101,0         | 102      | 100      | 84 a         | 125   | 114,0         | 114      | 114      |
| 35 a         | 119   | 116,0         | 116      | 116      | 84 b         | 129   | 115,0         | 115      | 115      |
| 35 b         | 121   | 106,0         | 106      | 106      | 85 a         | 134   | 121,5         | 121      | 122      |
| 37 a         | 119   | 115,0         | 115      | 115      | 85 b         | 133   | 118,0         | 118      | 118      |
| 37 b         | 126   | 116,5         | 117      | 116      | 86 a         | 134   | 123,5         | 123      | 124      |
| 38 a         | 136   | 120,5         | 121      | 120      | 86 b         | 132   | 118,5         | 119      | 118      |
| 38 b         | 133   | 123,5         | 124      | 123      | 91 a         | 123   | 113,0         | 113      | 113      |
| 39 a         | 110   | 106,5         | 107      | 106      | 91 b         | 129   | 115,0         | 115      | 115      |
| 39 b         | 125   | 119,5         | 121      | 118      | 95 a         | 125   | 116,5         | 116      | 117      |
| 40 a         | 111   | 95,0          | 95       | 95       | 95 b         | 118   | 112,0         | 112      | 112      |

|     |   |     |       |     |     |     |   |     |       |     |     |
|-----|---|-----|-------|-----|-----|-----|---|-----|-------|-----|-----|
| 40  | b | 108 | 104,0 | 104 | 104 | 96  | a | 121 | 112,0 | 111 | 113 |
| 42  | a | 115 | 109,0 | 109 | 109 | 96  | b | 124 | 117,5 | 116 | 119 |
| 42  | b | 119 | 108,5 | 107 | 110 | 97  | a | 116 | 107,5 | 108 | 107 |
| 43  | a | 109 | 102,0 | 102 | 102 | 97  | b | 120 | 116,5 | 117 | 116 |
| 43  | b | 113 | 106,5 | 107 | 106 | 98  | a | 130 | 120,0 | 121 | 119 |
| 47  | a | 133 | 120,5 | 120 | 121 | 98  | b | 129 | 121,5 | 120 | 123 |
| 47  | b | 133 | 119,5 | 120 | 119 | 99  | a | 130 | 120,5 | 119 | 122 |
| 49  | a | 132 | 110,5 | 110 | 111 | 99  | b | 137 | 129,5 | 128 | 131 |
| 49  | b | 131 | 110,0 | 110 | 110 | 101 | a | 122 | 109,0 | 109 | 109 |
| 50  | a | 128 | 111,5 | 112 | 111 | 101 | b | 125 | 108,0 | 109 | 107 |
| 50  | b | 128 | 113,0 | 112 | 114 | 102 | a | 108 | 109,0 | 109 | 109 |
| 51  | a | 128 | 180,5 | 182 | 179 | 103 | a | 126 | 113,5 | 112 | 115 |
| 51  | b | 131 | 210,0 | 204 | 216 | 103 | b | 119 | 115,5 | 116 | 115 |
| 52  | a | 120 | 107,0 | 107 | 107 | 104 | a | 130 | 107,5 | 107 | 108 |
| 52  | b | 119 | 110,0 | 110 | 110 | 104 | b | 130 | 122,0 | 122 | 122 |
| 105 | a | 113 | 101,0 | 101 | 101 | 173 | a | 107 | 105,5 | 106 | 105 |
| 105 | b | 99  | 95,5  | 96  | 95  | 173 | b | 122 | 113,5 | 114 | 113 |
| 106 | a | 102 | 97,0  | 97  | 97  | 174 | a | 121 | 142,5 | 137 | 148 |
| 106 | b | 99  | 96,5  | 97  | 96  | 175 | a | 123 | 154,5 | 155 | 154 |
| 107 | a | 128 | 109,0 | 110 | 108 | 183 | a | 121 | 104,5 | 103 | 106 |
| 107 | b | 130 | 113,0 | 113 | 113 | 188 | a | 121 | 115,5 | 116 | 115 |
| 108 | a | 126 | 115,0 | 114 | 116 | 188 | b | 131 | 116,0 | 117 | 115 |
| 108 | b | 132 | 117,5 | 117 | 118 | 189 | a | 119 | 115,0 | 115 | 115 |
| 109 | a | 122 | 113,0 | 112 | 114 | 189 | b | 118 | 116,0 | 117 | 115 |
| 109 | b | 127 | 110,5 | 110 | 111 | 191 | a | 109 | 99,0  | 99  | 99  |
| 110 | a | 118 | 107,5 | 107 | 108 | 191 | b | 114 | 104,0 | 104 | 104 |
| 110 | b | 127 | 108,5 | 108 | 109 | 193 | a | 138 | 150,5 | 149 | 152 |
| 112 | a | 122 | 104,5 | 104 | 105 | 194 | a | 110 | 101,5 | 102 | 101 |
| 112 | b | 119 | 104,5 | 105 | 104 | 194 | b | 109 | 102,0 | 101 | 103 |
| 114 | a | 127 | 124,0 | 131 | 117 | 196 | a | 112 | 100,0 | 100 | 100 |
| 114 | b | 126 | 115,5 | 116 | 115 | 196 | b | 111 | 102,0 | 103 | 101 |
| 115 | a | 114 | 105,0 | 106 | 104 | 197 | a | 100 | 103,5 | 104 | 103 |
| 116 | a | 122 | 111,5 | 111 | 112 | 197 | b | 95  | 100,0 | 101 | 99  |
| 116 | b | 120 | 116,5 | 115 | 118 | 199 | a | 116 | 109,0 | 109 | 109 |
| 117 | a | 116 | 116,0 | 116 | 116 | 199 | b | 118 | 110,0 | 109 | 111 |
| 117 | b | 122 | 111,0 | 110 | 112 | 200 | a | 137 | 140,5 | 139 | 142 |
| 118 | a | 112 | 112,0 | 111 | 113 | 201 | a | 125 | 117,5 | 118 | 117 |
| 118 | b | 127 | 109,0 | 109 | 109 | 201 | b | 127 | 109,5 | 109 | 110 |
| 121 | a | 130 | 114,0 | 114 | 114 | 202 | a | 118 | 105,0 | 105 | 105 |
| 121 | b | 135 | 121,5 | 121 | 122 | 202 | b | 103 | 103,0 | 104 | 102 |
| 122 | a | 131 | 117,0 | 115 | 119 | 205 | a | 132 | 125,5 | 126 | 125 |
| 122 | b | 136 | 117,5 | 118 | 117 | 205 | b | 132 | 117,5 | 117 | 118 |
| 123 | a | 120 | 104,5 | 105 | 104 | 207 | a | 134 | 129,0 | 128 | 130 |
| 123 | b | 117 | 106,0 | 106 | 106 | 207 | b | 139 | 128,5 | 130 | 127 |
| 124 | a | 116 | 99,0  | 99  | 99  | 209 | a | 106 | 97,5  | 98  | 97  |
| 124 | b | 118 | 102,0 | 102 | 102 | 209 | b | 100 | 101,5 | 101 | 102 |
| 126 | a | 125 | 111,5 | 112 | 111 | 210 | a | 122 | 108,5 | 108 | 109 |
| 126 | b | 124 | 119,5 | 119 | 120 | 210 | b | 122 | 108,0 | 109 | 107 |
| 127 | a | 131 | 114,5 | 120 | 109 | 211 | a | 115 | 108,5 | 109 | 108 |
| 127 | b | 130 | 127,0 | 128 | 126 | 211 | b | 114 | 106,0 | 105 | 107 |
| 128 | a | 116 | 94,0  | 94  | 94  | 212 | a | 137 | 119,0 | 120 | 118 |
| 128 | b | 127 | 120,5 | 120 | 121 | 213 | a | 127 | 113,5 | 114 | 113 |
| 129 | a | 119 | 121,5 | 121 | 122 | 213 | b | 126 | 111,0 | 110 | 112 |
| 130 | a | 101 | 100,5 | 101 | 100 | 214 | a | 111 | 101,0 | 102 | 100 |
| 131 | a | 110 | 102,5 | 102 | 103 | 214 | b | 104 | 101,5 | 101 | 102 |
| 131 | b | 116 | 104,0 | 104 | 104 | 215 | a | 108 | 103,0 | 102 | 104 |
| 132 | a | 108 | 112,5 | 113 | 112 | 215 | b | 106 | 99,0  | 99  | 99  |
| 132 | b | 116 | 112,0 | 112 | 112 | 216 | a | 110 | 100,0 | 100 | 100 |
| 134 | a | 117 | 125,0 | 126 | 124 | 216 | b | 107 | 108,0 | 109 | 107 |
| 135 | a | 123 | 122,0 | 123 | 121 | 217 | a | 102 | 96,0  | 97  | 95  |
| 135 | b | 123 | 127,5 | 127 | 128 | 219 | a | 126 | 125,0 | 124 | 126 |
| 136 | a | 115 | 119,5 | 120 | 119 | 220 | a | 127 | 116,5 | 116 | 117 |
| 136 | b | 122 | 117,0 | 117 | 117 | 221 | a | 135 | 118,0 | 119 | 117 |
| 137 | a | 123 | 199,5 | 200 | 199 | 221 | b | 129 | 107,5 | 108 | 107 |
| 138 | a | 102 | 156,5 | 161 | 152 | 222 | a | 110 | 104,5 | 105 | 104 |
| 139 | a | 117 | 115,0 | 115 | 115 | 222 | b | 122 | 110,5 | 108 | 113 |
| 141 | a | 128 | 175,0 | 174 | 176 | 224 | a | 132 | 125,0 | 125 | 125 |

|       |     |       |     |     |       |     |       |     |     |
|-------|-----|-------|-----|-----|-------|-----|-------|-----|-----|
| 142 a | 114 | 113,0 | 113 | 113 | 224 b | 127 | 116,0 | 118 | 114 |
| 142 b | 120 | 108,0 | 108 | 108 | 225 a | 124 | 126,5 | 125 | 128 |
| 143 a | 110 | 108,5 | 108 | 109 | 225 b | 127 | 112,0 | 112 | 112 |
| 143 b | 124 | 108,5 | 108 | 109 | 227 a | 122 | 109,0 | 109 | 109 |
| 144 a | 108 | 113,0 | 113 | 113 | 227 b | 121 | 105,0 | 105 | 105 |
| 145 a | 119 | 108,5 | 109 | 108 | 228 a | 120 | 110,0 | 110 | 110 |
| 145 b | 122 | 112,0 | 111 | 113 | 228 b | 124 | 106,0 | 105 | 107 |
| 147 a | 114 | 107,5 | 108 | 107 | 229 a | 114 | 112,5 | 112 | 113 |
| 147 b | 118 | 100,5 | 100 | 101 | 230 a | 125 | 112,5 | 112 | 113 |
| 151 a | 106 | 100,0 | 100 | 100 | 231 a | 109 | 101,0 | 102 | 100 |
| 151 b | 115 | 102,5 | 103 | 102 | 232 a | 127 | 112,5 | 113 | 112 |
| 154 a | 108 | 102,0 | 102 | 102 | 232 b | 133 | 109,5 | 109 | 110 |
| 155 b | 119 | 108,5 | 109 | 108 | 233 a | 134 | 129,5 | 129 | 130 |
| 156 a | 129 | 115,0 | 115 | 115 | 233 b | 138 | 127,5 | 127 | 128 |
| 156 b | 136 | 116,5 | 116 | 117 | 234 a | 130 | 129,5 | 130 | 129 |
| 159 a | 124 | 110,5 | 110 | 111 | 234 b | 133 | 119,0 | 121 | 117 |
| 159 b | 124 | 111,5 | 113 | 110 | 235 a | 126 | 115,5 | 115 | 116 |
| 161 a | 134 | 127,0 | 130 | 124 | 235 b | 132 | 117,5 | 119 | 116 |
| 161 b | 134 | 120,0 | 120 | 120 | 236 a | 115 | 105,0 | 105 | 105 |
| 163 a | 128 | 112,5 | 113 | 112 | 236 b | 113 | 105,5 | 105 | 106 |
| 163 b | 128 | 110,5 | 110 | 111 | 237 a | 122 | 104,5 | 104 | 105 |
| 165 a | 127 | 111,0 | 110 | 112 | 237 b | 120 | 106,5 | 106 | 107 |
| 165 b | 124 | 115,0 | 114 | 116 | 241 a | 114 | 103,0 | 105 | 101 |
| 168 a | 127 | 127,0 | 127 | 127 | 243 a | 125 | 108,0 | 108 | 108 |
| 169 a | 116 | 112,5 | 112 | 113 | 246 a | 125 | 110,0 | 110 | 110 |
| 169 b | 126 | 118,5 | 114 | 123 | 247 a | 142 | 155,5 | 154 | 157 |
| 170 a | 124 | 127,0 | 127 | 127 | 249 a | 109 | 103,5 | 103 | 104 |
| 172 a | 107 | 98,0  | 98  | 98  | 250 a | 138 | 147,0 | 145 | 149 |
| 172 b | 124 | 113,0 | 113 | 113 | 251 a | 108 | 121,5 | 121 | 122 |
|       |     |       |     |     | 254 a | 127 | 112,0 | 112 | 112 |

**Tabelle zu Abb. 5.16.:**

**Korrelation zwischen Ross & Clark und Half Life-Time Lg-Foamtester**

**(CO<sub>2</sub>-Gehalt ~ 5 g/l; n = 259 Wertepaare)**

| Probennummer | R & C [Sigma] | Mittelwert Lg Half Life-Time [s] | Probennummer | R & C [Sigma] | Mittelwert Lg Half Life-Time [s] |
|--------------|---------------|----------------------------------|--------------|---------------|----------------------------------|
| 1            | 120           | 113,5                            | 64           | 118           | 108,5                            |
| 2            | 124           | 120,0                            | 65           | 101           | 98,5                             |
| 3            | 112           | 113,0                            | 66           | 132           | 112,0                            |
| 4            | 116           | 110,5                            | 67           | 125           | 114,0                            |
| 5            | 116           | 113,0                            | 68           | 129           | 115,0                            |
| 6            | 115           | 114,5                            | 69           | 134           | 121,5                            |
| 7            | 108           | 107,5                            | 70           | 133           | 118,0                            |
| 8            | 107           | 101,0                            | 71           | 134           | 123,5                            |
| 9            | 130           | 124,0                            | 72           | 132           | 118,5                            |
| 10           | 132           | 120,0                            | 73           | 123           | 113,0                            |
| 11           | 115           | 119,0                            | 74           | 129           | 115,0                            |
| 12           | 118           | 119,0                            | 75           | 122           | 109,0                            |
| 13           | 119           | 114,0                            | 76           | 125           | 108,0                            |
| 14           | 123           | 119,0                            | 77           | 108           | 109,0                            |
| 15           | 121           | 118,5                            | 78           | 128           | 109,0                            |
| 16           | 119           | 96,0                             | 79           | 130           | 113,0                            |
| 17           | 127           | 116,0                            | 80           | 122           | 104,5                            |
| 18           | 125           | 122,0                            | 81           | 119           | 104,5                            |
| 19           | 119           | 118,5                            | 82           | 114           | 105,0                            |
| 20           | 122           | 108,5                            | 83           | 112           | 112,0                            |
| 21           | 126           | 114,5                            | 84           | 127           | 109,0                            |
| 22           | 121           | 105,5                            | 85           | 130           | 114,0                            |
| 23           | 120           | 112,0                            | 86           | 135           | 121,5                            |
| 24           | 125           | 109,5                            | 87           | 116           | 99,0                             |
| 25           | 122           | 112,0                            | 88           | 118           | 102,0                            |
| 26           | 133           | 114,0                            | 89           | 110           | 102,5                            |
| 27           | 119           | 116,0                            | 90           | 116           | 104,0                            |
| 28           | 121           | 106,0                            | 91           | 123           | 122,0                            |
| 29           | 119           | 115,0                            | 92           | 123           | 127,5                            |
| 30           | 126           | 116,5                            | 93           | 114           | 113,0                            |
| 31           | 136           | 120,5                            | 94           | 120           | 108,0                            |
| 32           | 133           | 123,5                            | 95           | 110           | 108,5                            |
| 33           | 111           | 95,0                             | 96           | 124           | 108,5                            |
| 34           | 108           | 104,0                            | 97           | 114           | 107,5                            |
| 35           | 115           | 109,0                            | 98           | 118           | 100,5                            |
| 36           | 119           | 108,5                            | 99           | 106           | 100,0                            |
| 37           | 132           | 110,5                            | 100          | 115           | 102,5                            |
| 38           | 131           | 110,0                            | 101          | 129           | 115,0                            |
| 39           | 128           | 111,5                            | 102          | 136           | 116,5                            |
| 40           | 128           | 113,0                            | 103          | 124           | 110,5                            |
| 41           | 119           | 106,0                            | 104          | 124           | 111,5                            |
| 42           | 116           | 106,5                            | 105          | 134           | 127,0                            |
| 43           | 119           | 108,0                            | 106          | 134           | 120,0                            |
| 44           | 123           | 110,0                            | 107          | 128           | 112,5                            |
| 45           | 129           | 109,5                            | 108          | 128           | 110,5                            |
| 46           | 109           | 104,0                            | 109          | 116           | 112,5                            |
| 47           | 127           | 111,0                            | 110          | 126           | 118,5                            |
| 48           | 109           | 99,0                             | 111          | 107           | 105,5                            |
| 49           | 113           | 102,0                            | 112          | 122           | 113,5                            |
| 50           | 110           | 116,5                            | 113          | 121           | 104,5                            |
| 51           | 134           | 122,0                            | 114          | 121           | 115,5                            |
| 52           | 130           | 113,0                            | 115          | 131           | 116,0                            |
| 53           | 116           | 107,0                            | 116          | 112           | 100,0                            |
| 54           | 119           | 110,0                            | 117          | 111           | 102,0                            |
| 55           | 113           | 114,5                            | 118          | 100           | 103,5                            |
| 56           | 117           | 109,0                            | 119          | 95            | 100,0                            |
| 57           | 121           | 112,5                            | 120          | 116           | 109,0                            |

|     |     |       |     |     |       |
|-----|-----|-------|-----|-----|-------|
| 58  | 129 | 112,0 | 121 | 118 | 110,0 |
| 59  | 118 | 102,5 | 122 | 125 | 117,5 |
| 60  | 130 | 113,0 | 123 | 127 | 109,5 |
| 61  | 124 | 109,0 | 124 | 118 | 105,0 |
| 62  | 127 | 112,5 | 125 | 103 | 103,0 |
| 63  | 120 | 110,5 | 126 | 132 | 125,5 |
| 127 | 132 | 117,5 | 193 | 124 | 119,0 |
| 128 | 106 | 97,5  | 194 | 116 | 113,0 |
| 129 | 100 | 101,5 | 195 | 115 | 102,0 |
| 130 | 122 | 108,5 | 196 | 118 | 116,0 |
| 131 | 122 | 108,0 | 197 | 125 | 120,0 |
| 132 | 137 | 119,0 | 198 | 132 | 124,0 |
| 133 | 127 | 113,5 | 199 | 127 | 100,0 |
| 134 | 126 | 111,0 | 200 | 125 | 113,5 |
| 135 | 108 | 103,0 | 201 | 130 | 113,0 |
| 136 | 106 | 99,0  | 202 | 115 | 114,0 |
| 137 | 110 | 100,0 | 203 | 111 | 101,0 |
| 138 | 107 | 108,0 | 204 | 114 | 114,0 |
| 139 | 102 | 96,0  | 205 | 120 | 120,0 |
| 140 | 127 | 116,5 | 206 | 122 | 113,0 |
| 141 | 135 | 118,0 | 207 | 114 | 106,0 |
| 142 | 129 | 107,5 | 208 | 116 | 107,5 |
| 143 | 132 | 125,0 | 209 | 118 | 108,0 |
| 144 | 127 | 116,0 | 210 | 115 | 104,5 |
| 145 | 124 | 126,5 | 211 | 128 | 107,5 |
| 146 | 127 | 112,0 | 212 | 126 | 115,0 |
| 147 | 122 | 109,0 | 213 | 132 | 117,5 |
| 148 | 121 | 105,0 | 214 | 122 | 113,0 |
| 149 | 120 | 110,0 | 215 | 127 | 110,5 |
| 150 | 124 | 106,0 | 216 | 131 | 117,0 |
| 151 | 125 | 112,5 | 217 | 136 | 117,5 |
| 152 | 126 | 115,5 | 218 | 120 | 104,5 |
| 153 | 132 | 117,5 | 219 | 117 | 106,0 |
| 154 | 122 | 104,5 | 220 | 134 | 129,0 |
| 155 | 120 | 106,5 | 221 | 139 | 128,5 |
| 156 | 125 | 108,0 | 222 | 110 | 104,5 |
| 157 | 125 | 110,0 | 223 | 122 | 110,5 |
| 158 | 127 | 112,0 | 224 | 134 | 129,5 |
| 159 | 128 | 122,0 | 225 | 138 | 127,5 |
| 160 | 128 | 112,5 | 226 | 114 | 103,0 |
| 161 | 122 | 117,0 | 227 | 109 | 103,5 |
| 162 | 121 | 105,5 | 228 | 109 | 102,0 |
| 163 | 110 | 106,5 | 229 | 113 | 106,5 |
| 164 | 125 | 119,5 | 230 | 120 | 107,0 |
| 165 | 133 | 120,5 | 231 | 119 | 110,0 |
| 166 | 133 | 119,5 | 232 | 96  | 92,0  |
| 167 | 122 | 116,0 | 233 | 102 | 97,5  |
| 168 | 116 | 108,0 | 234 | 122 | 107,5 |
| 169 | 121 | 112,0 | 235 | 128 | 112,0 |
| 170 | 124 | 117,5 | 236 | 119 | 107,0 |
| 171 | 116 | 107,5 | 237 | 124 | 111,5 |
| 172 | 120 | 116,5 | 238 | 125 | 116,5 |
| 173 | 122 | 111,5 | 239 | 118 | 112,0 |
| 174 | 120 | 116,5 | 240 | 126 | 113,5 |
| 175 | 116 | 116,0 | 241 | 119 | 115,5 |
| 176 | 122 | 111,0 | 242 | 118 | 107,5 |
| 177 | 117 | 115,0 | 243 | 127 | 108,5 |
| 178 | 108 | 102,0 | 244 | 116 | 94,0  |
| 179 | 127 | 111,0 | 245 | 127 | 120,5 |
| 180 | 124 | 115,0 | 246 | 108 | 112,5 |
| 181 | 109 | 99,0  | 247 | 116 | 112,0 |
| 182 | 114 | 104,0 | 248 | 115 | 119,5 |
| 183 | 110 | 101,5 | 249 | 122 | 117,0 |
| 184 | 109 | 102,0 | 250 | 119 | 108,5 |
| 185 | 115 | 108,5 | 251 | 122 | 112,0 |

|     |     |       |     |     |       |
|-----|-----|-------|-----|-----|-------|
| 186 | 114 | 106,0 | 252 | 119 | 108,5 |
| 187 | 109 | 101,0 | 253 | 107 | 98,0  |
| 188 | 130 | 129,5 | 254 | 124 | 113,0 |
| 189 | 133 | 119,0 | 255 | 111 | 101,0 |
| 190 | 115 | 105,0 | 256 | 104 | 101,5 |
| 191 | 113 | 105,5 | 257 | 114 | 112,5 |
| 192 | 119 | 106,0 | 258 | 127 | 112,5 |
|     |     |       | 259 | 133 | 109,5 |

**Tabelle zu Abb. 5.17.:**

**Korrelation zwischen Ross & Clark und Half Life-Time Lg-Foamtester  
(Weizenbiere; n = 56 Wertepaare)**

| Probennummer | R & C [Sigma] | Mittelwert Lg Half Life-Time [s] |
|--------------|---------------|----------------------------------|
| 1            | 122           | 117,0                            |
| 2            | 122           | 108,0                            |
| 3            | 120           | 113,5                            |
| 4            | 130           | 135,0                            |
| 5            | 127           | 132,0                            |
| 6            | 128           | 130,5                            |
| 7            | 119           | 121,5                            |
| 8            | 101           | 100,5                            |
| 9            | 117           | 125,0                            |
| 10           | 123           | 199,5                            |
| 11           | 102           | 156,5                            |
| 12           | 108           | 113,0                            |
| 13           | 138           | 147,0                            |
| 14           | 108           | 121,5                            |
| 15           | 124           | 130,0                            |
| 16           | 132           | 137,0                            |
| 17           | 130           | 149,0                            |
| 18           | 130           | 141,0                            |
| 19           | 97            | 225,0                            |
| 20           | 99            | 108,5                            |
| 21           | 127           | 127,5                            |
| 22           | 128           | 109,5                            |
| 23           | 128           | 180,5                            |
| 24           | 131           | 210,0                            |
| 25           | 122           | 147,5                            |
| 26           | 117           | 205,5                            |
| 27           | 98            | 171,5                            |
| 28           | 126           | 121,0                            |
| 29           | 126           | 135,0                            |
| 30           | 130           | 120,0                            |
| 31           | 129           | 121,5                            |
| 32           | 130           | 120,5                            |
| 33           | 137           | 129,5                            |
| 34           | 130           | 107,5                            |
| 35           | 130           | 122,0                            |
| 36           | 113           | 101,0                            |
| 37           | 99            | 95,5                             |
| 38           | 102           | 97,0                             |
| 39           | 99            | 96,5                             |
| 40           | 127           | 124,0                            |
| 41           | 126           | 115,5                            |
| 42           | 125           | 111,5                            |
| 43           | 124           | 119,5                            |
| 44           | 131           | 114,5                            |
| 45           | 130           | 127,0                            |
| 46           | 128           | 175,0                            |
| 47           | 127           | 127,0                            |
| 48           | 124           | 127,0                            |
| 49           | 121           | 142,5                            |

|    |     |       |
|----|-----|-------|
| 50 | 123 | 154,5 |
| 51 | 119 | 115,0 |
| 52 | 118 | 116,0 |
| 53 | 138 | 150,5 |
| 54 | 137 | 140,5 |
| 55 | 126 | 125,0 |
| 56 | 142 | 155,5 |

**Tabelle zu Abb. 5.18.:**

**Korrelation von Schaumstabilität (Ross & Clark) und CO<sub>2</sub>-Gehalt  
(n = 79 Wertepaare)**

| Probennummer | R & C [Sigma] | CO <sub>2</sub> -Gehalt [g/l] |
|--------------|---------------|-------------------------------|
| 5 a          | 123           | 7,25                          |
| 5 b          | 132           | 6,33                          |
| 7 a          | 124           | 6,92                          |
| 7 b          | 132           | 7,31                          |
| 8 a          | 130           | 7,44                          |
| 8 b          | 130           | 6,17                          |
| 12 a         | 97            | 8,70                          |
| 12 b         | 99            | 7,42                          |
| 14 a         | 122           | 6,78                          |
| 14 b         | 122           | 6,68                          |
| 31 a         | 127           | 6,61                          |
| 31 b         | 128           | 6,60                          |
| 51 a         | 128           | 8,32                          |
| 51 b         | 131           | 8,56                          |
| 57 a         | 98            | 8,36                          |
| 57 b         | 81            | 8,82                          |
| 63 a         | 120           | 6,66                          |
| 63 b         | 130           | 6,72                          |
| 64 a         | 127           | 5,22                          |
| 64 b         | 128           | 5,48                          |
| 66 a         | 110           | 7,00                          |
| 66 b         | 118           | 7,36                          |
| 67 a         | 126           | 8,03                          |
| 67 b         | 126           | 8,14                          |
| 98 a         | 130           | 7,65                          |
| 98 b         | 129           | 7,31                          |
| 99 a         | 130           | 7,39                          |
| 99 b         | 137           | 7,70                          |
| 104 a        | 130           | 5,64                          |
| 104 b        | 130           | 5,86                          |
| 105 a        | 113           | 5,17                          |
| 105 b        | 99            | 4,93                          |
| 106 a        | 101           | 5,00                          |
| 106 b        | 99            | 4,97                          |
| 114 a        | 127           | 8,05                          |
| 114 b        | 126           | 6,59                          |
| 126 a        | 125           | 6,59                          |
| 126 b        | 124           | 7,11                          |
| 129 a        | 119           | 7,30                          |
| 129 b        | 129           | 7,12                          |
| 130 a        | 101           | 7,55                          |
| 130 b        | 132           | 7,72                          |
| 133 a        | 118           | 6,86                          |
| 133 b        | 121           | 6,77                          |
| 134 a        | 117           | 7,27                          |
| 134 b        | 121           | 7,00                          |
| 137 a        | 123           | 7,94                          |
| 137 b        | 121           | 7,41                          |
| 138 a        | 102           | 8,09                          |
| 138 b        | 107           | 6,55                          |
| 141 a        | 128           | 8,86                          |
| 141 b        | 132           | 8,86                          |
| 146 a        | 120           | 8,43                          |
| 146 b        | 124           | 8,30                          |
| 160 a        | 126           | 7,31                          |
| 160 b        | 129           | 7,82                          |
| 168 a        | 129           | 6,21                          |

|      |     |      |
|------|-----|------|
| 168b | 133 | 5,96 |
| 170a | 124 | 6,98 |
| 170b | 132 | 6,86 |
| 174a | 121 | 8,46 |
| 174b | 119 | 8,41 |
| 175a | 123 | 8,88 |
| 175b | 136 | 8,22 |
| 189a | 119 | 7,12 |
| 189b | 118 | 7,11 |
| 190a | 120 | 9,49 |
| 190b | 124 | 9,52 |
| 192a | 133 | 7,06 |
| 192b | 143 | 7,15 |
| 193a | 138 | 7,06 |
| 193b | 137 | 7,13 |
| 244a | 125 | 7,43 |
| 244b | 130 | 6,91 |
| 245a | 128 | 6,00 |
| 145b | 134 | 7,23 |
| 247a | 142 | 7,59 |
| 247b | 138 | 7,57 |
| 250a | 138 | 7,19 |
| 250b | 142 | 9,59 |

**Tabelle zu Abb. 5.19.:****Korrelation von Schaumstabilität (Lg Foamtester) und CO<sub>2</sub>-Gehalt**

| Probenummer | Mittelwert (Lg Half Life-Time) [s] | CO <sub>2</sub> -Gehalt [g/l] |
|-------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 5 a         | 112,0                              | 7,25                          |
| 5 b         | 105,5                              | 6,33                          |
| 7 a         | 108,5                              | 6,92                          |
| 7 b         | 117,5                              | 7,31                          |
| 8 a         | 111,5                              | 7,44                          |
| 8 b         | 103,0                              | 6,17                          |
| 12 a        | 98,0                               | 8,70                          |
| 12 b        | 80,5                               | 7,42                          |
| 14 a        | 109,5                              | 6,78                          |
| 14 b        | 112,0                              | 6,68                          |
| 31 a        | 109,5                              | 6,61                          |
| 31 b        | 110,0                              | 6,60                          |
| 51 a        | 124,0                              | 8,32                          |
| 51 b        | 125,5                              | 8,56                          |
| 57 a        | 97,5                               | 8,36                          |
| 57 b        | 87,5                               | 8,82                          |
| 63 a        | 113,0                              | 6,66                          |
| 63 b        | 116,0                              | 6,72                          |
| 64 a        | 120,5                              | 5,22                          |
| 64 b        | 110,0                              | 5,48                          |
| 66 a        | 92,0                               | 7,00                          |
| 66 b        | 100,5                              | 7,36                          |
| 67 a        | 110,0                              | 8,03                          |
| 67 b        | 124,5                              | 8,14                          |
| 98 a        | 110,5                              | 7,65                          |
| 98 b        | 112,0                              | 7,31                          |
| 99 a        | 110,0                              | 7,39                          |
| 99 b        | 118,0                              | 7,70                          |
| 104 a       | 102,5                              | 5,64                          |
| 104 b       | 105,5                              | 5,86                          |
| 105 a       | 99,0                               | 5,17                          |
| 105 b       | 84,5                               | 4,93                          |
| 106 a       | 94,5                               | 5,00                          |
| 106 b       | 89,5                               | 4,97                          |
| 114 a       | 108,5                              | 8,05                          |
| 114 b       | 98,0                               | 6,59                          |
| 126 a       | 95,5                               | 6,59                          |
| 126 b       | 104,0                              | 7,11                          |
| 129 a       | 105,0                              | 7,30                          |
| 129 b       | 106,0                              | 7,12                          |
| 130 a       | 88,5                               | 7,55                          |
| 130 b       | 122,0                              | 7,72                          |
| 133 a       | 97,5                               | 6,86                          |
| 133 b       | 106,5                              | 6,77                          |
| 134 a       | 98,5                               | 7,27                          |
| 134 b       | 104,5                              | 7,00                          |
| 137 a       | 124,5                              | 7,94                          |
| 137 b       | 104,5                              | 7,41                          |
| 138 a       | 89,5                               | 8,09                          |
| 138 b       | 88,5                               | 6,55                          |
| 141 a       | 132,0                              | 8,86                          |

|       |       |      |
|-------|-------|------|
| 141 b | 134,5 | 8,86 |
| 146 a | 111,5 | 8,43 |
| 146 b | 116,0 | 8,30 |
| 160 a | 112,0 | 7,31 |
| 160 b | 118,5 | 7,82 |
| 168 a | 109,0 | 6,21 |
| 168 b | 114,0 | 5,96 |
| 170 a | 112,5 | 6,98 |
| 170 b | 117,5 | 6,86 |
| 174 a | 115,0 | 8,46 |
| 174 b | 111,0 | 8,41 |
| 175 a | 125,0 | 8,88 |
| 175 b | 121,0 | 8,22 |
| 189 a | 104,5 | 7,12 |
| 189 b | 107,5 | 7,11 |
| 190 a | 104,0 | 9,49 |
| 190 b | 107,0 | 9,52 |
| 192 a | 121,5 | 7,06 |
| 192 b | 121,0 | 7,15 |
| 193 a | 124,5 | 7,06 |
| 193 b | 121,0 | 7,13 |
| 244 a | 110,5 | 7,43 |
| 244 b | 108,0 | 6,91 |
| 245 a | 108,0 | 6,00 |
| 145 b | 110,0 | 7,23 |
| 247 a | 127,0 | 7,59 |
| 247 b | 126,0 | 7,57 |
| 250 a | 131,5 | 7,19 |
| 250 b | 139,0 | 9,59 |

**Tabelle zu Abb. 5.20.:**

**Korrelation zwischen Ross & Clark und NIBEM-Methode**

| Probennummer | R & C [Sigma] | NIBEM [s] |
|--------------|---------------|-----------|
| 1            | 127,0         | 267,0     |
| 2            | 117,0         | 312,0     |
| 3            | 127,0         | 286,0     |
| 4            | 120,0         | 258,5     |
| 5            | 119,0         | 274,5     |
| 6            | 116,0         | 267,0     |
| 7            | 118,0         | 267,0     |
| 8            | 125,0         | 296,0     |
| 9            | 124,0         | 293,0     |
| 10           | 128,0         | 255,5     |
| 11           | 127,0         | 308,0     |
| 12           | 124,5         | 270,0     |
| 13           | 122,0         | 268,5     |
| 14           | 121,0         | 270,5     |
| 15           | 115,0         | 275,0     |
| 16           | 119,0         | 265,5     |
| 17           | 124,0         | 290,0     |
| 18           | 128,5         | 295,5     |
| 19           | 133,5         | 243,0     |
| 20           | 129,5         | 257,5     |
| 21           | 130,5         | 255,0     |
| 22           | 127,5         | 263,5     |
| 23           | 134,0         | 248,5     |
| 24           | 127,5         | 258,5     |
| 25           | 131,0         | 255,0     |
| 26           | 138,0         | 266,5     |
| 27           | 124,0         | 224,5     |

**Tabelle zu Abb. 5.21.:**

**Korrelation zwischen Lg-Foamtester und NIBEM-Methode**

| Probennummer | Half Life-Time Lg Foamtester [s] | NIBEM [s] |
|--------------|----------------------------------|-----------|
| 1            | 110,0                            | 267,0     |
| 2            | 106,5                            | 312,0     |
| 3            | 111,0                            | 286,0     |
| 4            | 111,5                            | 258,5     |
| 5            | 109,0                            | 274,5     |
| 6            | 103,5                            | 267,0     |
| 7            | 108,5                            | 267,0     |
| 8            | 104,0                            | 296,0     |
| 9            | 105,0                            | 293,0     |
| 10           | 125,5                            | 255,5     |
| 11           | 128,5                            | 308,0     |
| 12           | 114,0                            | 270,0     |
| 13           | 116,0                            | 268,5     |
| 14           | 115,5                            | 270,5     |
| 15           | 110,0                            | 275,0     |
| 16           | 111,5                            | 265,5     |
| 17           | 108,5                            | 290,0     |
| 18           | 108,0                            | 295,5     |
| 19           | 125,5                            | 243,0     |
| 20           | 123,0                            | 257,5     |
| 21           | 125,5                            | 255,0     |
| 22           | 128,0                            | 263,5     |
| 23           | 132,0                            | 248,5     |
| 24           | 120,5                            | 258,5     |
| 25           | 122,5                            | 255,0     |
| 26           | 117,0                            | 266,5     |
| 27           | 109,0                            | 224,5     |

**Tabelle zu Abb. 5.22.:****Einfluss der Probentemperatur auf das gebildete Schaumvolumen**

| Probennummer | Eingestellte Temperatur [°C] | Schaumvolumen [ml] |
|--------------|------------------------------|--------------------|
| 1            | 0                            | 320                |
| 2            | 0                            | 315                |
| 3            | 2                            | 330                |
| 4            | 2                            | 330                |
| 5            | 5                            | 340                |
| 6            | 5                            | 340                |
| 7            | 6                            | 350                |
| 8            | 6                            | 350                |
| 9            | 20                           | 390                |
| 10           | 20                           | 390                |
| 11           | 20                           | 390                |
| 12           | 20                           | 390                |
| 13           | 34                           | 430                |
| 14           | 35                           | 435                |
| 15           | 36                           | 435                |
| 16           | 36                           | 440                |

**Tabelle zu Abb. 5.23.:****First Drain in Abhängigkeit von der Temperatur**

| Probennummer | Eingestellte Temperatur [°C] | First Drain [s] |
|--------------|------------------------------|-----------------|
| 1            | 0                            | 111             |
| 2            | 0                            | 115             |
| 3            | 0                            | 100             |
| 4            | 0                            | 109             |
| 5            | 5                            | 104             |
| 6            | 5                            | 114             |
| 7            | 5                            | 105             |
| 8            | 5                            | 115             |
| 9            | 20                           | 125             |
| 10           | 20                           | 129             |
| 11           | 20                           | 126             |
| 12           | 20                           | 132             |
| 13           | 36                           | 135             |
| 14           | 36                           | 135             |
| 15           | 36                           | 137             |
| 16           | 36                           | 140             |

**Tabelle zu Abb. 5.24.:****Half Life-Time in Abhängigkeit von der Temperatur**

| Probennummer | Eingestellte Temperatur [°C] | Lg Foamtester Half Life-Time [s] |
|--------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1            | 0                            | 117                              |
| 2            | 0                            | 122                              |
| 3            | 0                            | 113                              |
| 4            | 0                            | 116                              |
| 5            | 5                            | 120                              |
| 6            | 5                            | 125                              |
| 7            | 5                            | 119                              |
| 8            | 5                            | 124                              |
| 9            | 20                           | 121                              |
| 10           | 20                           | 121                              |
| 11           | 20                           | 121                              |
| 12           | 20                           | 121                              |
| 13           | 36                           | 104                              |
| 14           | 36                           | 107                              |
| 15           | 36                           | 104                              |
| 16           | 36                           | 107                              |

**Tabelle zu Abb. 5.25.:**  
**Zerfallszeiten von 75 % des aufgeschäumten Biervolumens**  
**mit und ohne Temperaturkompensation**

Biertemperatur 20 °C  
 Spülwassertemperatur 13 °C  
 Spülzeit 3 x 1 min

|             | mit Temperaturkompensation |                |                    | ohne Temperaturkompensation |                |                    |
|-------------|----------------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|----------------|--------------------|
|             | Schaumvolumen [ml]         | First Drain[s] | Half Life-Time [s] | Schaumvolumen [ml]          | First Drain[s] | Half Life-Time [s] |
| 1. Messung  | 440                        | 156            | 130                | 440                         | 178            | 138                |
| 2. Messung  | 440                        | 160            | 129                | 440                         | 179            | 137                |
| 3. Messung  | 440                        | 157            | 129                | 440                         | 174            | 139                |
| 4. Messung  | 445                        | 161            | 127                | 440                         | 178            | 138                |
| 5. Messung  | 445                        | 156            | 126                | 440                         | 178            | 138                |
| 6. Messung  | 445                        | 160            | 126                | 440                         | 181            | 138                |
| 7. Messung  | 435                        | 156            | 126                | 440                         | 173            | 139                |
| 8. Messung  | 445                        | 159            | 128                | 440                         | 178            | 138                |
| 9. Messung  | 435                        | 158            | 127                | 440                         | 174            | 138                |
| 10. Messung | 445                        | 162            | 127                | 440                         | 177            | 137                |
| 11. Messung | 435                        | 159            | 128                | 440                         | 174            | 138                |
| 12. Messung | 435                        | 163            | 127                | 440                         | 179            | 137                |
| Mittelwert  | 440,4                      | 158,9          | 127,5              | 440,0                       | 176,9          | 137,9              |

Biertemperatur 20 °C  
 Spülwassertemperatur 20 °C  
 Spülzeit 3 x 1 min

|             | mit Temperaturkompensation |                |                    | ohne Temperaturkompensation |                |                    |
|-------------|----------------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|----------------|--------------------|
|             | Schaumvolumen [ml]         | First Drain[s] | Half Life-Time [s] | Schaumvolumen [ml]          | First Drain[s] | Half Life-Time [s] |
| 1. Messung  | 450                        | 189            | 141                | 445                         | 175            | 133                |
| 2. Messung  | 455                        | 190            | 141                | 450                         | 180            | 133                |
| 3. Messung  | 450                        | 185            | 140                | 450                         | 176            | 133                |
| 4. Messung  | 455                        | 191            | 141                | 455                         | 182            | 133                |
| 5. Messung  | 450                        | 186            | 140                | 450                         | 178            | 132                |
| 6. Messung  | 455                        | 192            | 141                | 450                         | 182            | 132                |
| 7. Messung  | 450                        | 186            | 140                | 450                         | 177            | 132                |
| 8. Messung  | 455                        | 190            | 140                | 450                         | 178            | 132                |
| 9. Messung  | 450                        | 185            | 141                | 450                         | 177            | 132                |
| 10. Messung | 455                        | 188            | 140                | 450                         | 180            | 132                |
| 11. Messung | 450                        | 185            | 137                | 450                         | 177            | 132                |
| 12. Messung | 455                        | 187            | 139                | 450                         | 180            | 132                |
| Mittelwert  | 452,5                      | 187,8          | 140,1              | 450,0                       | 178,5          | 132,3              |

Biertemperatur 20 °C  
 Spülwassertemperatur 25 °C  
 Spülzeit 3 x 1 min

|             | mit Temperaturkompensation |                |                    | ohne Temperaturkompensation |                |                    |
|-------------|----------------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|----------------|--------------------|
|             | Schaumvolumen [ml]         | First Drain[s] | Half Life-Time [s] | Schaumvolumen [ml]          | First Drain[s] | Half Life-Time [s] |
| 1. Messung  | 455                        | 194            | 142                | 450                         | 177            | 123                |
| 2. Messung  | 460                        | 202            | 143                | 450                         | 181            | 124                |
| 3. Messung  | 455                        | 200            | 140                | 450                         | 177            | 124                |
| 4. Messung  | 460                        | 206            | 142                | 450                         | 180            | 124                |
| 5. Messung  | 455                        | 203            | 142                | 450                         | 176            | 127                |
| 6. Messung  | 460                        | 209            | 142                | 450                         | 176            | 127                |
| 7. Messung  | 455                        | 206            | 143                | 450                         | 179            | 127                |
| 8. Messung  | 460                        | 211            | 143                | 450                         | 181            | 125                |
| 9. Messung  | 455                        | 209            | 144                | 450                         | 174            | 126                |
| 10. Messung | 460                        | 214            | 145                | 450                         | 179            | 126                |
| 11. Messung | 455                        | 210            | 144                | 450                         | 176            | 126                |
| 12. Messung | 460                        | 214            | 144                | 450                         | 182            | 126                |
| Mittelwert  | 457,5                      | 206,5          | 142,8              | 450,0                       | 178,2          | 125,4              |

**Tabelle zu Abb. 5.26. und 5.27.:**

**Abb. 5.26.: Volumendosierung mit und ohne Temperaturkompensation bei 18 °C**

**Abb. 5.27.: Verifizierung der dosierten Menge über die Zerfallszeiten**

| ohne Temperaturkompensation |                    |                 |                    |
|-----------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|
|                             | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half Life-Time [s] |
| Pils                        | 462,5              | 154             | 109                |
| Light                       | 452,5              | 131             | 98                 |
| Schwarzbier                 | 492,5              | 148             | 85                 |
| Alkoholfrei (Dialyse)       | 447,5              | 130             | 96                 |
| Alkoholfrei (Kältekontakt)  | 487,5              | 172             | 105                |
| Hefeweizen                  | 557,5              | 218             | 111                |
| Kristallweizen              | 567,5              | 222             | 111                |

| mit Temperaturkompensation |                    |                 |                    |
|----------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|
|                            | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half Life-Time [s] |
| Pils                       | 462,5              | 150             | 107                |
| Light                      | 457,5              | 132             | 97                 |
| Schwarzbier                | 482,5              | 146             | 85                 |
| Alkoholfrei (Dialyse)      | 447,5              | 126             | 96                 |
| Alkoholfrei (Kältekontakt) | 507,5              | 183             | 108                |
| Hefeweizen                 | 557,5              | 213             | 109                |
| Kristallweizen             | 562,5              | 216             | 110                |

**Half Life-Time [s]**

|                            | ohne Temperaturkompensation | mit Temperaturkompensation |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Pils                       | 109                         | 107                        |
| Light                      | 98                          | 97                         |
| Schwarzbier                | 85                          | 85                         |
| Alkoholfrei (Dialyse)      | 96                          | 96                         |
| Alkoholfrei (Kältekontakt) | 105                         | 108                        |
| Hefeweizen                 | 111                         | 109                        |
| Kristallweizen             | 111                         | 110                        |

**First Drain [s]**

|                            | ohne Temperaturkompensation | mit Temperaturkompensation |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Pils                       | 154                         | 150                        |
| Light                      | 131                         | 132                        |
| Schwarzbier                | 148                         | 146                        |
| Alkoholfrei (Dialyse)      | 130                         | 126                        |
| Alkoholfrei (Kältekontakt) | 172                         | 183                        |
| Hefeweizen                 | 218                         | 213                        |
| Kristallweizen             | 222                         | 216                        |

**Schaumvolumen [ml]**

|                            | ohne Temperaturkompensation | mit Temperaturkompensation |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Pils                       | 462,5                       | 462,5                      |
| Light                      | 452,5                       | 457,5                      |
| Schwarzbier                | 492,5                       | 482,5                      |
| Alkoholfrei (Dialyse)      | 447,5                       | 447,5                      |
| Alkoholfrei (Kältekontakt) | 487,5                       | 507,5                      |
| Hefeweizen                 | 557,5                       | 557,5                      |
| Kristallweizen             | 567,5                       | 562,5                      |

**Tabelle zu Abb. 5.28.:**  
**Dosierung in Abhängigkeit von der Viskosität**

Ethylenglykolkonzentration

| 0%          | dosierte Menge [g] | dosierte Menge [ml] | Leergewicht [g] | Vollgewicht [g] | Dichte [g/ml]: |
|-------------|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 1. Messung  | 61,65              | 62,19545413         | 67,03           | 128,68          | 0,99123        |
| 2. Messung  | 61,36              | 61,90288833         | 67,66           | 129,02          |                |
| 3. Messung  | 61,40              | 61,94324223         | 67,90           | 129,30          |                |
| 4. Messung  | 61,72              | 62,26607346         | 68,03           | 129,75          |                |
| 5. Messung  | 61,57              | 62,11474633         | 67,97           | 129,54          |                |
| 6. Messung  | 61,78              | 62,32660432         | 68,11           | 129,89          |                |
| 7. Messung  | 61,99              | 62,53846231         | 68,28           | 130,27          |                |
| 8. Messung  | 62,49              | 63,04288611         | 68,42           | 130,91          |                |
| 9. Messung  | 61,72              | 62,26607346         | 68,29           | 130,01          |                |
| Mittelwert: | 62,29              |                     |                 |                 |                |

| 10%         | dosierte Menge [g] | dosierte Menge [ml] | Leergewicht [g] | Vollgewicht [g] | Dichte [g/ml]: |
|-------------|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 1. Messung  | 61,98              | 61,67655137         | 67,50           | 129,48          | 1,00492        |
| 2. Messung  | 62,22              | 61,91537635         | 67,85           | 130,07          |                |
| 3. Messung  | 62,31              | 62,00493572         | 68,03           | 130,34          |                |
| 4. Messung  | 62,37              | 62,06464196         | 68,05           | 130,42          |                |
| 5. Messung  | 63,03              | 62,72141066         | 68,12           | 131,15          |                |
| 6. Messung  | 62,27              | 61,96513155         | 68,22           | 130,49          |                |
| 7. Messung  | 62,28              | 61,97508259         | 68,20           | 130,48          |                |
| 8. Messung  | 62,32              | 62,01488676         | 68,23           | 130,55          |                |
| 9. Messung  | 62,68              | 62,37312423         | 67,85           | 130,53          |                |
| 10. Messung | 62,42              | 62,11439717         | 68,26           | 130,68          |                |
| Mittelwert: | 62,08              |                     |                 |                 |                |

| 15%         | dosierte Menge [g] | dosierte Menge [ml] | Leergewicht [g] | Vollgewicht [g] | Dichte [g/ml]: |
|-------------|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 1. Messung  | 62,43              | 61,66108625         | 67,98           | 130,41          | 1,01247        |
| 2. Messung  | 62,52              | 61,74997778         | 68,08           | 130,60          |                |
| 3. Messung  | 62,86              | 62,08579020         | 68,15           | 131,01          |                |
| 4. Messung  | 63,11              | 62,33271109         | 68,14           | 131,25          |                |
| 5. Messung  | 62,43              | 61,66108625         | 68,40           | 130,83          |                |
| 6. Messung  | 62,44              | 61,67096309         | 68,30           | 130,74          |                |
| 7. Messung  | 62,54              | 61,76973145         | 68,24           | 130,78          |                |
| 8. Messung  | 62,53              | 61,75985461         | 68,37           | 130,9           |                |
| 9. Messung  | 62,88              | 62,10554387         | 68,34           | 131,22          |                |
| 10. Messung | 62,55              | 61,77960828         | 68,24           | 130,79          |                |
| Mittelwert: | 61,86              |                     |                 |                 |                |

| 20%         | dosierte Menge [g] | dosierte Menge [ml] | Leergewicht [g] | Vollgewicht [g] | Dichte [g/ml]: |
|-------------|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 1. Messung  | 62,58              | 61,35474573         | 67,90           | 130,48          | 1,01997        |
| 2. Messung  | 63,33              | 62,09006147         | 68,07           | 131,40          |                |
| 3. Messung  | 62,70              | 61,47239625         | 68,32           | 131,02          |                |
| 4. Messung  | 64,85              | 63,58030138         | 68,27           | 133,12          |                |
| 5. Messung  | 62,44              | 61,21748679         | 68,33           | 130,77          |                |
| 6. Messung  | 62,51              | 61,28611626         | 68,38           | 130,89          |                |
| 7. Messung  | 62,53              | 61,30572468         | 68,39           | 130,92          |                |
| 8. Messung  | 63,02              | 61,78613096         | 68,26           | 131,28          |                |
| 9. Messung  | 62,96              | 61,72730571         | 68,27           | 131,23          |                |
| 10. Messung | 63,06              | 61,82534780         | 68,39           | 131,45          |                |
| Mittelwert: | 61,76              |                     |                 |                 |                |

| 25%         | dosierte Menge [g] | dosierte Menge [ml] | Leergewicht [g] | Vollgewicht [g] | Dichte [g/ml]: |
|-------------|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 1. Messung  | 63,25              | 61,57755364         | 68,17           | 131,42          | 1,02716        |
| 2. Messung  | 62,92              | 61,25627945         | 68,23           | 131,15          |                |
| 3. Messung  | 63,97              | 62,27851552         | 68,26           | 132,23          |                |
| 4. Messung  | 63,08              | 61,41204876         | 68,29           | 131,37          |                |
| 5. Messung  | 63,02              | 61,35363527         | 68,30           | 131,32          |                |
| 6. Messung  | 62,77              | 61,11024573         | 68,31           | 131,08          |                |
| 7. Messung  | 62,95              | 61,28548619         | 68,30           | 131,25          |                |
| 8. Messung  | 62,95              | 61,28548619         | 68,56           | 131,51          |                |
| 9. Messung  | 63,73              | 62,04486156         | 68,31           | 132,04          |                |
| 10. Messung | 64,29              | 62,59005413         | 68,45           | 132,74          |                |
| Mittelwert: | 61,62              |                     |                 |                 |                |

| 30%         | dosierte Menge [g] | dosierte Menge [ml] | Leergewicht [g] | Vollgewicht [g] | Dichte [g/ml]: |
|-------------|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 1. Messung  | 63,39              | 61,29493899         | 68,42           | 131,81          | 1,03418        |
| 2. Messung  | 63,76              | 61,65271036         | 68,58           | 132,34          |                |
| 3. Messung  | 63,18              | 61,09187956         | 68,48           | 131,66          |                |
| 4. Messung  | 63,46              | 61,36262546         | 68,51           | 131,97          |                |
| 5. Messung  | 63,04              | 60,95650660         | 68,67           | 131,71          |                |
| 6. Messung  | 62,94              | 60,85981164         | 68,55           | 131,49          |                |
| 7. Messung  | 63,32              | 61,22725251         | 68,48           | 131,80          |                |
| 8. Messung  | 63,61              | 61,50766791         | 68,54           | 132,15          |                |
| 9. Messung  | 63,36              | 61,26593050         | 68,40           | 131,76          |                |
| Mittelwert: | 61,25              |                     |                 |                 |                |

| 35%         | dosierte Menge [g] | dosierte Menge [ml] | Leergewicht [g] | Vollgewicht [g] | Dichte [g/ml]: |
|-------------|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 1. Messung  | 63,57              | 61,09503993         | 67,50           | 131,07          | 1,04051        |
| 2. Messung  | 63,70              | 61,21997866         | 68,16           | 131,86          |                |
| 3. Messung  | 63,66              | 61,18153598         | 68,19           | 131,85          |                |
| 4. Messung  | 63,10              | 60,64333836         | 68,35           | 131,45          |                |
| 5. Messung  | 63,79              | 61,30647471         | 68,36           | 132,15          |                |
| 6. Messung  | 63,73              | 61,24881068         | 68,31           | 132,04          |                |
| 7. Messung  | 63,37              | 60,9028265          | 68,38           | 131,75          |                |
| 8. Messung  | 63,73              | 61,24881068         | 68,37           | 132,10          |                |
| 9. Messung  | 63,56              | 61,08542926         | 68,36           | 131,92          |                |
| 10. Messung | 63,40              | 60,93165851         | 68,55           | 131,95          |                |
| Mittelwert: | 61,09              |                     |                 |                 |                |

| Viskosität [mPas] | dosierte Menge [g] |
|-------------------|--------------------|
| 1,1863            | 62,29              |
| 1,4932            | 62,08              |
| 1,6841            | 61,86              |
| 1,8970            | 61,76              |
| 2,1472            | 61,62              |
| 2,3963            | 61,25              |
| 2,7082            | 61,09              |

**Tabelle zu Abb. 5.29.:  
Relative Veränderung der zu messenden Parameter**

|                |                    |                 |                    |
|----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| Dosierzeit [s] | Biervolumen [ml]   |                 |                    |
| <b>23,8</b>    | <b>147,8</b>       |                 |                    |
|                | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half Life-Time [s] |
| 1. Messung     | 415                | 157             | 146                |
| 2. Messung     | 420                | 158             | 143                |
| 3. Messung     | 420                | 158             | 143                |
| 4. Messung     | 415                | 157             | 144                |
| Mittelwerte    | 418                | 158             | 144                |

|                |                    |                 |                    |
|----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| Dosierzeit [s] | Biervolumen [ml]   |                 |                    |
| <b>26,4</b>    | <b>164</b>         |                 |                    |
|                | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half Life-Time [s] |
| 1. Messung     | 460                | 140             | 105                |
| 2. Messung     | 465                | 147             | 105                |
| 3. Messung     | 460                | 148             | 107                |
| 4. Messung     | 465                | 146             | 106                |
| Mittelwerte    | 463                | 145             | 106                |

|                |                    |                 |                    |
|----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| Dosierzeit [s] | Biervolumen [ml]   |                 |                    |
| <b>29,0</b>    | <b>180,2</b>       |                 |                    |
|                | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half Life-Time [s] |
| 1. Messung     | 510                | 148             | 88                 |
| 2. Messung     | 510                | 143             | 87                 |
| 3. Messung     | 510                | 143             | 87                 |
| 4. Messung     | 510                | 144             | 87                 |
| Mittelwerte    | 510                | 145             | 87                 |

|                                                   |         |         |         |
|---------------------------------------------------|---------|---------|---------|
| Prozentuale Auswertung (Grundeinstellung = 100 %) |         |         |         |
| Dosierzeit [s]                                    | 23,8    | 26,4    | 29      |
| dosiertes Biervolumen [ml]                        | 90,15%  | 100,00% | 109,85% |
| Schaumvolumen [ml]                                | 90,27%  | 100,00% | 110,27% |
| First Drain [s]                                   | 108,43% | 100,00% | 100,52% |
| Half Life-Time [s]                                | 136,17% | 100,00% | 82,51%  |

**Tabelle zu Abb. 6.1., 6.2. und 6.3.:**

**Abb. 6.1.: Abhängigkeit des Proben temperatur auf das Schaumvolumen**

**Abb. 6.2.: First Drain in Abhängigkeit von der Spülwasser – und Proben temperatur**

**Abb. 6.3.: Half Life-Time in Abhängigkeit von der Spülwasser – und Proben temperatur**

| 1. Messung      |                    |                 |                    |       |
|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-------|
| Temperatur [°C] | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half Life-Time [s] |       |
| 3,0             |                    | 353,3           | 153,9              | 168,4 |
| 7,8             |                    | 397,8           | 160,7              | 154,7 |
| 9,9             |                    | 406,1           | 160,1              | 152,2 |
| 13,4            |                    | 422,2           | 161,0              | 141,1 |
| 20,0            |                    | 456,7           | 155,0              | 120,1 |
| 24,0            |                    | 475,6           | 151,4              | 110,3 |
| 27,6            |                    | 492,2           | 141,9              | 100,6 |

| 2. Messung      |                    |                 |                    |       |
|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-------|
| Temperatur [°C] | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half Life-Time [s] |       |
| 3,0             |                    | 351,7           | 152,4              | 166,4 |
| 7,3             |                    | 388,9           | 158,2              | 157,3 |
| 9,7             |                    | 401,1           | 156,7              | 152,6 |
| 13,3            |                    | 475,0           | 160,3              | 142,2 |
| 19,9            |                    | 458,3           | 157,6              | 119,7 |
| 23,7            |                    | 471,7           | 152,2              | 112,1 |
| 27,8            |                    | 492,2           | 143,7              | 101,4 |

| Mittelwerte aus je 2 Messungen |                    |                 |                    |       |
|--------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-------|
| Temperatur [°C]                | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half Life-Time [s] |       |
| 3,0                            |                    | 352,5           | 153,2              | 167,4 |
| 7,6                            |                    | 393,3           | 159,4              | 156,0 |
| 9,8                            |                    | 403,6           | 158,4              | 152,4 |
| 13,4                           |                    | 448,6           | 160,7              | 141,7 |
| 19,9                           |                    | 457,5           | 156,3              | 119,9 |
| 23,8                           |                    | 473,6           | 151,8              | 111,2 |
| 27,7                           |                    | 492,2           | 142,8              | 101,0 |

**Tabelle zu Abb. 6.4., 6.5., 6.6. und 6.7.:**

**Abb. 6.4.: Gebildetes Schaumvolumen in Abhängigkeit vom Absolutdruck**

**Abb. 6.5.: Schaumdrainage mit steigendem Druck**

**Abb. 6.6.: Half Life-Time in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck**

**Abb. 6.7.: Gesamtzerfallszeit von 75 % des aufgeschäumten Biervolumens**

| <b>Pilsener 1</b>   |                    |                 |                    |                             |  |
|---------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|--|
| Absolutdruck [mbar] | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half-Life Time [s] | Gesamtzerfallszeit 75 % [s] |  |
| 900                 | 545                | 172             | 114                | 286                         |  |
| 950                 | 495                | 166             | 118                | 284                         |  |
| 975                 | 510                | 164             | 119                | 282                         |  |
| 1000                | 458                | 165             | 126                | 291                         |  |
| 1020                | 478                | 159             | 121                | 279                         |  |
| 1040                | 425                | 144             | 122                | 265                         |  |
| 1060                | 448                | 147             | 124                | 271                         |  |
| 1080                | 438                | 142             | 113                | 254                         |  |
| 1100                | 460                | 145             | 121                | 266                         |  |
| 1125                | 420                | 139             | 131                | 270                         |  |
| 1150                | 413                | 136             | 130                | 266                         |  |
| 1200                | 423                | 133             | 130                | 263                         |  |
| 1300                | 390                | 121             | 145                | 265                         |  |

| <b>Bockbier</b>     |                    |                 |                    |                             |  |
|---------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|--|
| Absolutdruck [mbar] | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half-Life Time [s] | Gesamtzerfallszeit 75 % [s] |  |
| 900                 | 498                | 161             | 102                | 263                         |  |
| 950                 | 453                | 160             | 114                | 274                         |  |
| 975                 | 468                | 155             | 110                | 264                         |  |
| 1000                | 448                | 147             | 114                | 261                         |  |
| 1020                | 445                | 153             | 116                | 269                         |  |
| 1040                | 393                | 139             | 120                | 259                         |  |
| 1060                | 410                | 146             | 128                | 274                         |  |
| 1080                | 403                | 138             | 124                | 261                         |  |
| 1100                | 420                | 143             | 119                | 261                         |  |
| 1125                | 393                | 130             | 118                | 247                         |  |
| 1150                | 385                | 135             | 143                | 278                         |  |
| 1200                | 390                | 128             | 136                | 263                         |  |
| 1300                | 350                | 109             | 146                | 254                         |  |

| <b>Alkoholfrei (Kältekontakt)</b> |                    |                 |                    |                             |  |
|-----------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|--|
| Absolutdruck [mbar]               | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half-Life Time [s] | Gesamtzerfallszeit 75 % [s] |  |
| 900                               | 565                | 184             | 120                | 304                         |  |
| 950                               | 513                | 177             | 118                | 295                         |  |
| 975                               | 535                | 173             | 117                | 290                         |  |
| 1000                              | 500                | 167             | 118                | 284                         |  |
| 1020                              | 488                | 166             | 117                | 283                         |  |
| 1040                              | 460                | 165             | 120                | 284                         |  |
| 1060                              | 445                | 159             | 110                | 269                         |  |
| 1080                              | 458                | 157             | 114                | 270                         |  |
| 1100                              | 450                | 155             | 114                | 268                         |  |
| 1125                              | 450                | 147             | 120                | 267                         |  |
| 1150                              | 458                | 155             | 128                | 283                         |  |
| 1200                              | 435                | 138             | 124                | 262                         |  |
| 1300                              | 390                | 115             | 132                | 247                         |  |

| <b>Schwarzbier</b>  |                    |                 |                    |                             |     |
|---------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|-----|
| Absolutdruck [mbar] | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half-Life Time [s] | Gesamtzerfallszeit 75 % [s] |     |
|                     | 900                | 560             | 138                | 81                          | 219 |
|                     | 950                | 508             | 149                | 90                          | 239 |
|                     | 975                | 528             | 137                | 84                          | 220 |
|                     | 1000               | 500             | 137                | 86                          | 222 |
|                     | 1020               | 445             | 137                | 87                          | 224 |
|                     | 1040               | 453             | 135                | 93                          | 228 |
|                     | 1060               | 483             | 128                | 81                          | 209 |
|                     | 1080               | 458             | 134                | 97                          | 230 |
|                     | 1100               | 463             | 127                | 84                          | 211 |
|                     | 1125               | 440             | 124                | 98                          | 222 |
|                     | 1150               | 445             | 126                | 97                          | 223 |
|                     | 1200               | 428             | 120                | 101                         | 221 |
|                     | 1300               | 380             | 105                | 119                         | 223 |

| <b>Kristallweizen</b> |                    |                 |                    |                             |     |
|-----------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|-----|
| Absolutdruck [mbar]   | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half-Life Time [s] | Gesamtzerfallszeit 75 % [s] |     |
|                       | 900                | 600             | 190                | 119                         | 790 |
|                       | 950                | 590             | 213                | 125                         | 803 |
|                       | 975                | 598             | 195                | 122                         | 793 |
|                       | 1000               | 563             | 198                | 121                         | 761 |
|                       | 1020               | 550             | 191                | 115                         | 741 |
|                       | 1040               | 548             | 196                | 116                         | 743 |
|                       | 1060               | 553             | 186                | 111                         | 739 |
|                       | 1080               | 538             | 194                | 119                         | 731 |
|                       | 1100               | 525             | 181                | 111                         | 706 |
|                       | 1125               | 515             | 185                | 112                         | 700 |
|                       | 1150               | 513             | 181                | 117                         | 693 |
|                       | 1200               | 488             | 174                | 120                         | 661 |
|                       | 1300               | 445             | 158                | 133                         | 603 |

| <b>Schankbier</b>   |                    |                 |                    |                             |     |
|---------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|-----|
| Absolutdruck [mbar] | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half-Life Time [s] | Gesamtzerfallszeit 75 % [s] |     |
|                     | 900                | 513             | 137                | 98                          | 235 |
|                     | 950                | 470             | 130                | 102                         | 232 |
|                     | 975                | 483             | 129                | 103                         | 231 |
|                     | 1000               | 463             | 124                | 103                         | 227 |
|                     | 1020               | 460             | 125                | 106                         | 230 |
|                     | 1040               | 408             | 113                | 109                         | 222 |
|                     | 1060               | 425             | 117                | 108                         | 224 |
|                     | 1080               | 418             | 110                | 108                         | 218 |
|                     | 1100               | 428             | 115                | 106                         | 221 |
|                     | 1125               | 410             | 104                | 101                         | 205 |
|                     | 1150               | 390             | 106                | 118                         | 223 |
|                     | 1200               | 398             | 100                | 110                         | 210 |
|                     | 1300               | 363             | 81                 | 111                         | 192 |

| <b>Alkoholfrei (Dialyse)</b> |                    |                 |                    |                             |     |
|------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|-----|
| Absolutdruck [mbar]          | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half-Life Time [s] | Gesamtzerfallszeit 75 % [s] |     |
|                              | 900                | 515             | 140                | 97                          | 237 |
|                              | 950                | 468             | 125                | 102                         | 227 |
|                              | 975                | 480             | 129                | 103                         | 231 |
|                              | 1000               | 458             | 123                | 103                         | 226 |
|                              | 1020               | 458             | 122                | 103                         | 224 |
|                              | 1040               | 420             | 112                | 110                         | 222 |
|                              | 1060               | 420             | 112                | 110                         | 222 |
|                              | 1080               | 410             | 108                | 109                         | 217 |
|                              | 1100               | 430             | 114                | 107                         | 221 |
|                              | 1125               | 405             | 102                | 109                         | 211 |
|                              | 1150               | 400             | 105                | 115                         | 220 |
|                              | 1200               | 400             | 95                 | 109                         | 204 |
|                              | 1300               | 360             | 79                 | 110                         | 188 |

| <b>Pilsener 2</b>   |                    |                 |                    |                             |     |
|---------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|-----|
| Absolutdruck [mbar] | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half-Life Time [s] | Gesamtzerfallszeit 75 % [s] |     |
|                     | 900                | 548             | 168                | 113                         | 281 |
|                     | 950                | 505             | 169                | 115                         | 284 |
|                     | 975                | 515             | 159                | 113                         | 272 |
|                     | 1000               | 488             | 155                | 114                         | 269 |
|                     | 1020               | 480             | 152                | 115                         | 267 |
|                     | 1040               | 445             | 144                | 116                         | 260 |
|                     | 1060               | 473             | 143                | 103                         | 245 |
|                     | 1080               | 440             | 142                | 118                         | 259 |
|                     | 1100               | 460             | 139                | 108                         | 246 |
|                     | 1125               | 438             | 134                | 122                         | 256 |
|                     | 1150               | 440             | 139                | 126                         | 265 |
|                     | 1200               | 425             | 131                | 127                         | 257 |
|                     | 1300               | 380             | 110                | 137                         | 247 |

| <b>Hefeweizen</b>   |                    |                 |                    |                             |     |
|---------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|-----|
| Absolutdruck [mbar] | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half-Life Time [s] | Gesamtzerfallszeit 75 % [s] |     |
|                     | 900                | 600             | 195                | 119                         | 314 |
|                     | 950                | 600             | 223                | 131                         | 353 |
|                     | 975                | 600             | 198                | 122                         | 320 |
|                     | 1000               | 590             | 206                | 122                         | 328 |
|                     | 1020               | 573             | 200                | 119                         | 319 |
|                     | 1040               | 568             | 210                | 120                         | 330 |
|                     | 1060               | 568             | 206                | 116                         | 322 |
|                     | 1080               | 543             | 213                | 125                         | 338 |
|                     | 1100               | 548             | 190                | 109                         | 298 |
|                     | 1125               | 525             | 196                | 117                         | 313 |
|                     | 1150               | 525             | 193                | 119                         | 312 |
|                     | 1200               | 503             | 190                | 124                         | 314 |
|                     | 1300               | 450             | 172                | 137                         | 309 |

| <b>Querschnitt</b>  |                    |                 |                    |                             |  |
|---------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|--|
| Absolutdruck [mbar] | Schaumvolumen [ml] | First Drain [s] | Half-Life Time [s] | Gesamtzerfallszeit 75 % [s] |  |
| 900                 | 549,2              | 164,8           | 106,8              | 271,6                       |  |
| 950                 | 511,1              | 167,8           | 112,5              | 280,3                       |  |
| 975                 | 523,9              | 159,6           | 109,9              | 269,6                       |  |
| 1000                | 496,1              | 157,8           | 111,7              | 269,4                       |  |
| 1020                | 486,1              | 155,8           | 110,7              | 266,5                       |  |
| 1040                | 457,5              | 150,7           | 113,7              | 264,3                       |  |
| 1060                | 470,3              | 149,4           | 109,6              | 258,9                       |  |
| 1080                | 455,8              | 148,3           | 113,8              | 262,1                       |  |
| 1100                | 464,7              | 145,1           | 108,4              | 253,6                       |  |
| 1125                | 443,9              | 139,9           | 113,9              | 253,8                       |  |
| 1150                | 440,8              | 141,4           | 121,3              | 262,7                       |  |
| 1200                | 431,9              | 134,1           | 119,8              | 253,9                       |  |
| 1300                | 389,7              | 116,3           | 129,6              | 245,9                       |  |

Der Querschnitt wurde erstellt als Mittelwert aller Proben des untersuchten Parameters bei der entsprechenden Druckstufe

**Tabellen zu Abb. 7.1., 7.2. und 7.3.:**

**Abb. 7.1.: Logarithmische Zerfallskurve eines Bierschaums (Pilsener Bier)**

**Abb. 7.2.: Wiederholbarkeit der logarithmischen Zerfallskurven eines Bierschaums (Pilsener Bier)**

| Zeit [s] bis zum Erreichen der Markierung |             |            |            |            |            |
|-------------------------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| ml                                        | Mittelwerte | 1. Messung | 2. Messung | 3. Messung | 4. Messung |
| 50                                        | 99          | 99         | 99         | 98         | 100        |
| 60                                        | 112         | 112        | 112        | 111        | 113        |
| 70                                        | 128         | 122        | 128        | 128        | 133        |
| 80                                        | 146         | 145        | 145        | 144        | 150        |
| 90                                        | 164         | 163        | 166        | 163        | 163        |
| 100                                       | 187         | 185        | 186        | 185        | 190        |
| 110                                       | 213         | 212        | 212        | 209        | 217        |
| 120                                       | 241         | 241        | 241        | 238        | 244        |
| 130                                       | 277         | 278        | 275        | 274        | 280        |
| 140                                       | 325         | 328        | 320        | 321        | 329        |

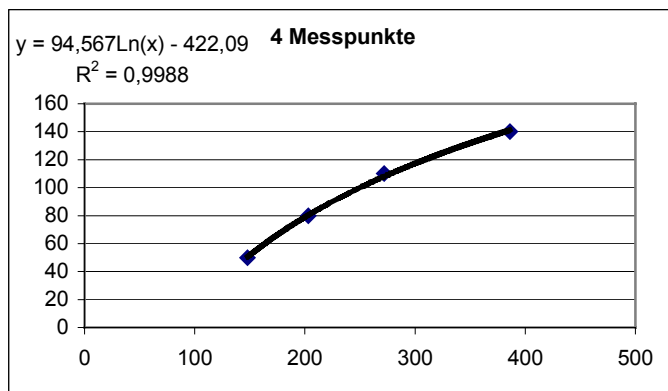
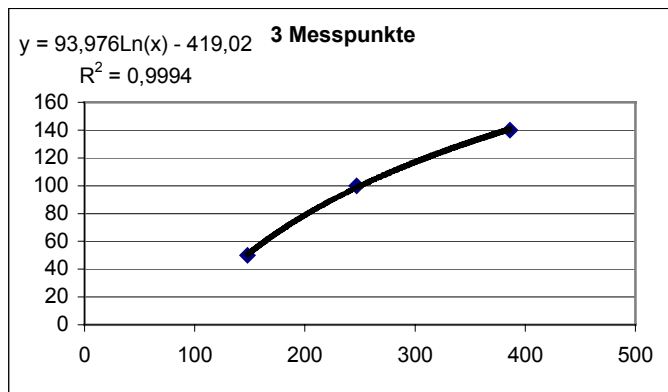
**Tabelle zu Abb. 7.3.:**

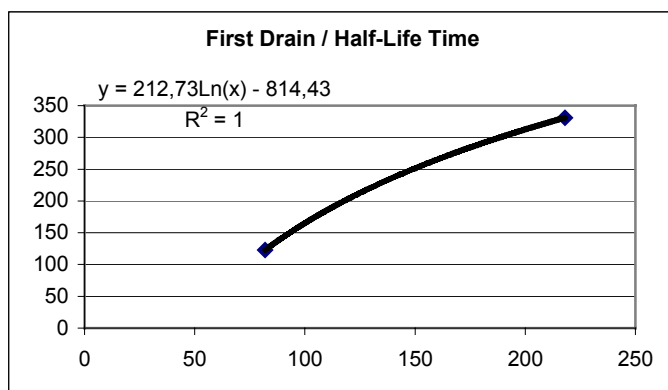
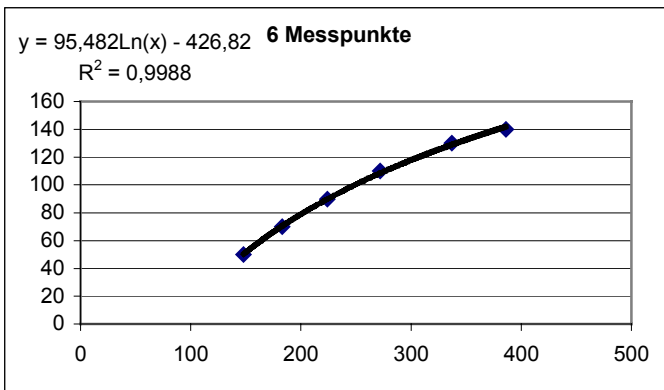
**Wiederholbarkeit der logarithmischen Zerfallskurven eines Bierschaums (Hefeweizen)**

| Zeit [s] bis zum Erreichen der Markierung |             |            |            |            |            |
|-------------------------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| ml                                        | Mittelwerte | 1. Messung | 2. Messung | 3. Messung | 4. Messung |
| 50                                        | 152         | 150        | 149        | 154        | 154        |
| 60                                        | 171         | 168        | 168        | 174        | 173        |
| 70                                        | 188         | 186        | 186        | 190        | 191        |
| 80                                        | 207         | 204        | 204        | 209        | 209        |
| 90                                        | 228         | 224        | 225        | 230        | 231        |
| 100                                       | 250         | 247        | 247        | 254        | 253        |
| 110                                       | 275         | 272        | 271        | 278        | 279        |
| 120                                       | 304         | 300        | 299        | 309        | 308        |
| 130                                       | 339         | 335        | 333        | 343        | 344        |
| 140                                       | 386         | 379        | 379        | 393        | 392        |

**Tabelle zu Abb. 7.4.:**  
**Unterschiede der logarithmischen Zerfallskurven**  
**mit verschiedener Anzahl von Messpunkten**

| Zerfallszeit bis zur Markierung [ml] | t [s] |
|--------------------------------------|-------|
| 218                                  | 82    |
| 331                                  | 123   |
| 148                                  | 50    |
| 247                                  | 100   |
| 386                                  | 140   |
| 148                                  | 50    |
| 203                                  | 80    |
| 272                                  | 110   |
| 386                                  | 140   |
| 148                                  | 50    |
| 183                                  | 70    |
| 224                                  | 90    |
| 272                                  | 110   |
| 337                                  | 130   |
| 386                                  | 140   |





**Tabelle zu Abb. 7.6.; 7.7. und 7.8.:**

**Abb. 7.6.: Korrelation der First Drain-Zeit  
und „Theoretischer Schaumkennzahl“**

**Abb. 7.7.: Korrelation der Half-Life Time  
und „Theoretischer Schaumkennzahl“**

**Abb.7.8.: Korrelation zwischen Ross & Clark-Messwert  
und „Theoretischer Schaumkennzahl“**

| Probennummer | Theoretische Schaumkennzahl | R & C [Sigma] | First Drain [s] | Half Life-Time [s] |
|--------------|-----------------------------|---------------|-----------------|--------------------|
| 6 B          | 309,91311712                | 119,0         | 153,5           | 98,5               |
| 30 B         | 298,18154194                | 105,0         | 141,0           | 90,5               |
| 31 B         | 342,79673796                | 114,5         | 136,0           | 99,0               |
| 34 B         | 328,43339415                | 124,0         | 146,5           | 101,0              |
| 39 B         | 273,82547731                | 103,0         | 145,0           | 85,5               |
| 51 B         | 361,11122180                | 101,0         | 125,0           | 95,0               |
| 53 B         | 359,03775520                | 112,5         | 125,5           | 95,0               |
| 60 A         | 260,24017701                | 111,5         | 166,5           | 85,5               |
| 67 A         | 316,35023258                | 116,0         | 148,5           | 98,5               |
| 76 A         | 310,72510893                | 124,0         | 159,0           | 100,5              |
| 85 A         | 209,26181382                | 99,0          | 162,5           | 68,5               |
| 88 A         | 338,94046868                | 118,5         | 141,0           | 101,0              |
| 94 A         | 301,53740579                | 126,5         | 149,0           | 94,5               |
| 97 A         | 329,45512745                | 112,0         | 135,5           | 95,5               |
| 98 A         | 333,78482801                | 119,0         | 138,0           | 98,0               |
| 101 A        | 332,91586205                | 116,0         | 143,0           | 100,5              |
| 102 A        | 351,12547514                | 123,0         | 125,0           | 93,0               |
| 104 A        | 372,81884869                | 127,5         | 123,5           | 96,0               |
| 112 A        | 385,42636398                | 107,0         | 122,0           | 97,0               |
| 114 A        | 374,40888402                | 108,0         | 116,0           | 89,0               |

Bemerkung:

Zur Berechnung der theoretischen Schaumkennzahl wurde ein konstantes Argument von "10" vorgegeben

**Tabelle zu Abb. 7.9. und 7.10.:**

**Abb. 7.9.: Korrelation von dynamischer Viskosität und First Drain-Zeit**

**Abb. 7.10: Korrelation von dynamischer Viskosität und Half Life-Time**

|                            | Viskosität [mPas] | First Drain | Half Life-Time |     |
|----------------------------|-------------------|-------------|----------------|-----|
| Alkoholfrei (Dialyse)      | 1,496             | 138         |                | 103 |
| Light                      | 1,848             | 146         |                | 105 |
| Pilsener 1                 | 1,303             | 118         |                | 122 |
| Alkoholfrei (Kältekontakt) | 1,258             | 114         |                | 117 |
| Pilsener 2                 | 1,506             | 163         |                | 115 |
| Schwarzbier                | 1,553             | 147         |                | 91  |
| Kristallweizen             | 1,666             | 140         |                | 123 |
| Hefeweizen                 | 1,820             | 225         |                | 131 |
| Bock                       | 1,792             | 209         |                | 125 |

**Tabelle zu Abb. 8.9.:**

**Minimaler und maximaler Messwert bei der Grundkonzeption des Lg-Foamtesters**

| Datum      | Uhrzeit | Half Life-Time [s] | Umgebungsdruck [mbar] | Datum      | Uhrzeit | Half Life-Time [s] | Umgebungsdruck [mbar] |
|------------|---------|--------------------|-----------------------|------------|---------|--------------------|-----------------------|
| 18.02.2003 | 08:45   | 120                | 1034                  | 21.02.2003 | 08:45   | 112                | 1027                  |
| 18.02.2003 | 09:00   | 116                |                       | 21.02.2003 | 09:00   | 114                |                       |
| 18.02.2003 | 09:15   | 115                |                       | 21.02.2003 | 09:15   | 116                |                       |
| 18.02.2003 | 09:30   | 114                |                       | 21.02.2003 | 09:30   | 114                |                       |
| 18.02.2003 | 09:45   | 113                |                       | 21.02.2003 | 09:45   | 113                |                       |
| 18.02.2003 | 10:00   | 116                |                       | 21.02.2003 | 10:00   | 113                |                       |
| 18.02.2003 | 10:15   | 115                |                       | 22.02.2003 | 08:45   | 112                | 1032                  |
| 18.02.2003 | 10:30   | 113                |                       | 22.02.2003 | 09:00   | 109                |                       |
| 18.02.2003 | 10:45   | 113                |                       | 22.02.2003 | 09:15   | 108                |                       |
| 18.02.2003 | 11:00   | 113                |                       | 22.02.2003 | 09:30   | 109                |                       |
| 18.02.2003 | 11:15   | 111                |                       | 22.02.2003 | 09:45   | 109                |                       |
| 18.02.2003 | 11:30   | 112                |                       | 22.02.2003 | 10:00   | 109                |                       |
| 18.02.2003 | 11:45   | 110                |                       | 22.02.2003 | 10:15   | 110                |                       |
| 18.02.2003 | 12:00   | 111                |                       | 22.02.2003 | 10:30   | 109                |                       |
| 18.02.2003 | 12:15   | 110                |                       | 22.02.2003 | 10:45   | 109                |                       |
| 18.02.2003 | 12:30   | 111                |                       | 22.02.2003 | 11:00   | 110                |                       |
| 18.02.2003 | 12:45   | 111                |                       | 22.02.2003 | 11:15   | 110                |                       |
| 18.02.2003 | 13:00   | 114                |                       | 22.02.2003 | 11:30   | 109                |                       |
| 18.02.2003 | 13:15   | 114                |                       | 22.02.2003 | 11:45   | 109                |                       |
| 18.02.2003 | 13:30   | 115                |                       | 22.02.2003 | 12:00   | 108                |                       |
| 19.02.2003 | 08:45   | 117                | 1028                  | 22.02.2003 | 12:15   | 110                |                       |
| 19.02.2003 | 09:00   | 113                |                       | 22.02.2003 | 12:30   | 109                |                       |
| 19.02.2003 | 09:15   | 112                |                       | 22.02.2003 | 12:45   | 110                |                       |
| 19.02.2003 | 09:30   | 109                |                       | 22.02.2003 | 13:00   | 109                |                       |
| 19.02.2003 | 09:45   | 109                |                       | 22.02.2003 | 13:15   | 110                |                       |
| 19.02.2003 | 10:00   | 110                |                       | 22.02.2003 | 13:30   | 109                |                       |
| 19.02.2003 | 10:15   | 108                |                       | 22.02.2003 | 13:45   | 110                |                       |
| 19.02.2003 | 10:30   | 108                |                       | 22.02.2003 | 14:00   | 111                |                       |
| 19.02.2003 | 10:45   | 108                |                       | 22.02.2003 | 14:15   | 111                |                       |
| 19.02.2003 | 11:00   | 108                |                       | 22.02.2003 | 14:30   | 110                |                       |
| 19.02.2003 | 11:15   | 108                |                       | 24.02.2003 | 08:45   | 109                | 1029                  |
| 19.02.2003 | 11:30   | 108                |                       | 24.02.2003 | 09:00   | 107                |                       |
| 19.02.2003 | 11:45   | 107                |                       | 24.02.2003 | 09:15   | 106                |                       |
| 19.02.2003 | 12:00   | 109                |                       | 24.02.2003 | 09:30   | 106                |                       |
| 19.02.2003 | 12:15   | 109                |                       | 24.02.2003 | 09:45   | 105                |                       |
| 19.02.2003 | 12:30   | 107                |                       | 24.02.2003 | 10:00   | 105                |                       |
| 19.02.2003 | 12:45   | 108                |                       | 24.02.2003 | 10:15   | 104                |                       |
| 19.02.2003 | 13:00   | 108                |                       | 24.02.2003 | 10:30   | 105                |                       |
| 19.02.2003 | 13:15   | 108                |                       | 24.02.2003 | 10:45   | 106                |                       |
| 19.02.2003 | 13:30   | 107                |                       | 24.02.2003 | 11:00   | 106                |                       |
| 20.02.2003 | 08:45   | 114                | 1021                  | 24.02.2003 | 11:15   | 106                |                       |
| 20.02.2003 | 09:00   | 113                |                       | 24.02.2003 | 11:30   | 104                |                       |
| 20.02.2003 | 09:15   | 112                |                       | 24.02.2003 | 11:45   | 105                |                       |
| 20.02.2003 | 09:30   | 113                |                       | 24.02.2003 | 12:00   | 106                |                       |
| 20.02.2003 | 09:45   | 115                |                       | 24.02.2003 | 12:15   | 103                |                       |
| 20.02.2003 | 10:00   | 112                |                       | 24.02.2003 | 12:30   | 105                |                       |
| 20.02.2003 | 10:15   | 113                |                       | 24.02.2003 | 12:45   | 104                |                       |
| 20.02.2003 | 10:30   | 111                |                       | 24.02.2003 | 13:00   | 100                |                       |
| 20.02.2003 | 10:45   | 112                |                       | 24.02.2003 | 13:15   | 101                |                       |
| 20.02.2003 | 11:00   | 112                |                       | 24.02.2003 | 13:30   | 102                |                       |

**Tabelle zu Abb. 8.10.:**  
**Minimaler und maximaler Messwert bei der 3.**  
**Entwicklungsstufe des Lg- Foamtesters**

| Datum      | Uhrzeit | Half Life-Time [s] | Datum      | Uhrzeit | Half Life-Time [s] |
|------------|---------|--------------------|------------|---------|--------------------|
| 14.04.2003 | 8:45    | 103,4              | 17.04.2003 | 11:00   | 103,3              |
| 14.04.2003 | 9:00    | 102,3              | 17.04.2003 | 11:15   | 103,7              |
| 14.04.2003 | 9:15    | 103,5              | 17.04.2003 | 11:30   | 97,2               |
| 14.04.2003 | 9:30    | 103,0              | 17.04.2003 | 11:45   | 102,2              |
| 15.04.2003 | 8:45    | 104,7              | 17.04.2003 | 12:00   | 103,2              |
| 15.04.2003 | 9:00    | 103,6              | 17.04.2003 | 12:15   | 103,6              |
| 15.04.2003 | 9:15    | 101,2              | 17.04.2003 | 12:30   | 104,7              |
| 15.04.2003 | 9:30    | 102,8              | 17.04.2003 | 12:45   | 105,1              |
| 15.04.2003 | 9:45    | 103,0              | 17.04.2003 | 13:00   | 103,4              |
| 15.04.2003 | 10:00   | 103,5              | 17.04.2003 | 13:15   | 103,7              |
| 15.04.2003 | 10:15   | 102,7              | 17.04.2003 | 13:30   | 103,8              |
| 15.04.2003 | 10:30   | 103,9              | 17.04.2003 | 13:45   | 104,0              |
| 15.04.2003 | 10:45   | 103,3              | 17.04.2003 | 14:00   | 102,7              |
| 15.04.2003 | 11:00   | 103,9              | 17.04.2003 | 14:15   | 102,9              |
| 15.04.2003 | 11:15   | 102,2              | 17.04.2003 | 14:30   | 101,9              |
| 15.04.2003 | 11:30   | 103,0              | 17.04.2003 | 14:45   | 103,0              |
| 15.04.2003 | 11:45   | 102,6              | 17.04.2003 | 15:00   | 102,7              |
| 15.04.2003 | 12:00   | 100,4              | 17.04.2003 | 15:15   | 103,0              |
| 15.04.2003 | 12:15   | 105,5              | 17.04.2003 | 15:30   | 104,7              |
| 16.04.2003 | 8:45    | 102,0              | 17.04.2003 | 15:45   | 103,7              |
| 16.04.2003 | 9:00    | 105,7              | 21.04.2003 | 8:45    | 106,1              |
| 16.04.2003 | 9:15    | 107,7              | 21.04.2003 | 9:00    | 101,8              |
| 16.04.2003 | 9:30    | 107,4              | 21.04.2003 | 9:15    | 102,4              |
| 16.04.2003 | 9:45    | 105,7              | 21.04.2003 | 9:30    | 103,4              |
| 16.04.2003 | 10:00   | 105,1              | 21.04.2003 | 9:45    | 102,8              |
| 16.04.2003 | 10:15   | 106,5              | 21.04.2003 | 10:00   | 103,6              |
| 16.04.2003 | 10:30   | 105,5              | 21.04.2003 | 10:15   | 103,0              |
| 16.04.2003 | 10:45   | 105,8              | 21.04.2003 | 10:30   | 104,2              |
| 16.04.2003 | 11:00   | 104,9              | 21.04.2003 | 10:45   | 104,3              |
| 16.04.2003 | 11:15   | 104,1              | 21.04.2003 | 11:00   | 102,9              |
| 16.04.2003 | 11:30   | 103,8              | 21.04.2003 | 11:15   | 103,9              |
| 16.04.2003 | 11:45   | 105,5              | 22.04.2003 | 8:45    | 105,6              |
| 16.04.2003 | 12:00   | 100,5              | 22.04.2003 | 9:00    | 103,1              |
| 16.04.2003 | 12:15   | 102,3              | 22.04.2003 | 9:15    | 104,2              |
| 16.04.2003 | 12:30   | 106,7              | 22.04.2003 | 9:30    | 102,5              |
| 16.04.2003 | 12:45   | 104,3              | 22.04.2003 | 9:45    | 101,5              |
| 16.04.2003 | 13:00   | 103,9              | 22.04.2003 | 10:00   | 102,5              |
| 16.04.2003 | 13:15   | 107,3              | 22.04.2003 | 10:15   | 101,3              |
| 16.04.2003 | 13:30   | 105,5              | 22.04.2003 | 10:30   | 102,7              |
| 16.04.2003 | 13:45   | 106,9              | 22.04.2003 | 10:45   | 102,3              |
| 16.04.2003 | 14:00   | 106,2              | 22.04.2003 | 11:00   | 100,0              |
| 17.04.2003 | 8:45    | 104,8              | 23.04.2003 | 8:45    | 102,8              |
| 17.04.2003 | 9:00    | 107,4              | 23.04.2003 | 9:00    | 102,4              |
| 17.04.2003 | 9:15    | 108,3              | 23.04.2003 | 9:15    | 101,2              |
| 17.04.2003 | 9:30    | 106,8              | 24.04.2003 | 8:45    | 100,8              |
| 17.04.2003 | 9:45    | 108,2              | 24.04.2003 | 9:00    | 102,0              |
| 17.04.2003 | 10:00   | 107,0              | 24.04.2003 | 9:15    | 100,8              |
| 17.04.2003 | 10:15   | 105,4              | 24.04.2003 | 9:30    | 100,4              |
| 17.04.2003 | 10:30   | 105,6              | 24.04.2003 | 9:45    | 100,9              |
| 17.04.2003 | 10:45   | 104,6              | 24.04.2003 | 10:00   | 101,6              |

**Tabelle zu Abb. 8.11.:****Vergleich der Standardabweichungen der verschiedenen Geräte und Biersorten**

|        |             |      |
|--------|-------------|------|
| Lg neu | Schwarzbier | 2,4  |
|        | Pilsener    | 1,97 |
|        | Hefeweizen  | 1,66 |
| Lg alt | Pilsener    | 3,6  |

**Tabelle zu Abb. 8.12.:**

**Korrelation zwischen Ross & Clark und Lg-Foamtester**

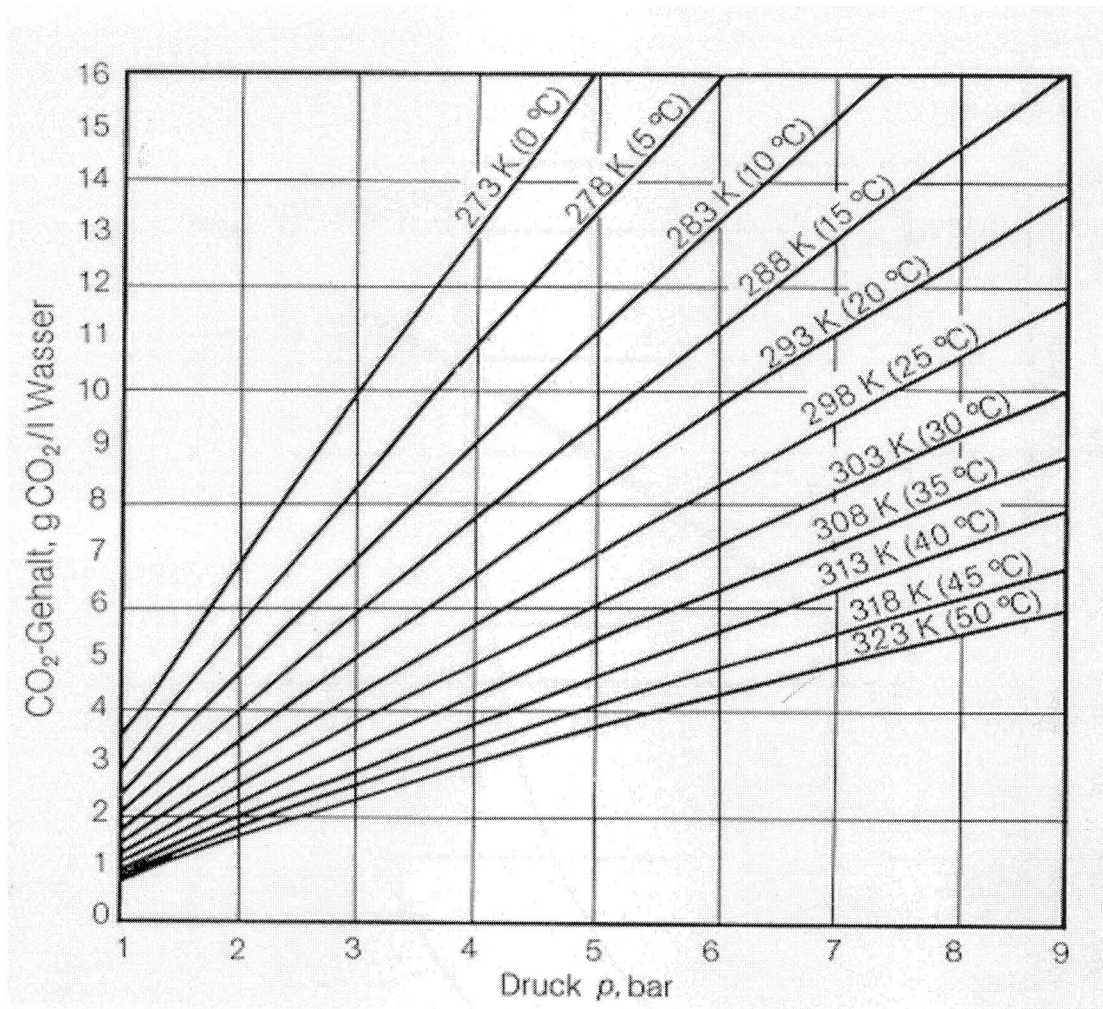
|     |           |      | Lg neu         |                 |       |         |                |                 |       |        |
|-----|-----------|------|----------------|-----------------|-------|---------|----------------|-----------------|-------|--------|
| Nr. | Probennr. | SoSI | 1. Messung     |                 |       |         | 2. Messung     |                 |       |        |
|     |           |      | dos. Vol. [ml] | Schaumvol. [ml] | FD[s] | HLT [s] | dos. Vol. [ml] | Schaumvol. [ml] | FD[s] | HLT[s] |
| 1   | 195A      | 123  | 166,483        | 435             | 139,8 | 102,9   | 166,850        | 430             | 139,5 | 105,6  |
| 2   | 174A      | 123  | 166,894        | 560             | 212,9 | 114,7   | 167,531        | 560             | 217,5 | 118,9  |
| 3   | 174B      | 123  | 167,395        | 650             | 171,5 | 278,5   | 167,298        | 650             | 180,3 | 296,3  |
| 4   | 188B      | 130  | 166,858        | 450             | 152,9 | 104,1   | 167,187        | 450             | 149,6 | 104,7  |
| 5   | 206B      | 130  | 167,447        | 440             | 151,8 | 101,5   | 167,447        | 440             | 151,0 | 99,4   |
| 6   | 166B      | 130  | 167,461        | 435             | 139,0 | 105,2   | 167,461        | 435             | 138,8 | 104,6  |
| 7   | 196B      | 142  | 167,122        | 420             | 146,0 | 115,1   | 167,064        | 405             | 135,6 | 115,9  |
| 8   | 209B      | 130  | 167,613        | 440             | 135,0 | 98,3    | 166,326        | 440             | 138,9 | 103,8  |
| 9   | 216A      | 130  | 167,997        | 435             | 128,3 | 96,0    | 167,382        | 440             | 130,4 | 93,3   |
| 10  | 201A      | 198  | 166,459        | 420             | 115,0 | 89,8    | 167,161        | 425             | 116,2 | 86,6   |
| 11  | 191B      | 398  | 167,447        | 560             | 194,8 | 93,9    | 167,349        | 560             | 192,7 | 93,5   |
| 12  | 182B      | 111  | 167,633        | 415             | 118,5 | 98,9    | 167,394        | 415             | 102,1 | 99,6   |
| 13  | 187B      | 321  | 166,960        | 565             | 151,1 | 90,3    | 167,158        | 570             | 153,7 | 89,7   |
| 14  | 51A       | 130  | 166,813        | 405             | 108,4 | 90,5    | 167,831        | 405             | 112,5 | 91,8   |
| 15  | 58A       | 111  | 167,771        | 420             | 121,8 | 96,9    | 167,057        | 425             | 127,1 | 98,8   |
| 16  | 83A       | 111  | 167,546        | 480             | 169,3 | 98,6    | 166,806        | 485             | 168,5 | 97,5   |
| 17  | 113A      | 122  | 166,023        | 400             | 104,2 | 96,8    | 167,526        | 400             | 100,6 | 95,6   |
| 18  | 134A      | 322  | 167,243        | 565             | 212,6 | 314,2   | 168,083        | 560             | 210,7 | 310,0  |
| 19  | 155B      | 130  | 167,830        | 440             | 140,5 | 105,5   | 167,098        | 440             | 139,8 | 106,0  |
| 20  | 161B      | 364  | 167,098        | 515             | 188,0 | 98,5    | 167,213        | 515             | 191,4 | 98,9   |
| 21  | 70A       | 321  | 167,616        | 350             | 98,5  | 113,2   | 167,333        | 350             | 98,8  | 114,0  |
| 22  | 70B       | 321  | 167,410        | 420             | 119,7 | 98,7    | 167,157        | 415             | 116,1 | 99,9   |
| 23  | 61A       | 121  | 166,980        | 460             | 152,7 | 97,6    | 166,952        | 460             | 155,8 | 98,4   |
| 24  | 64A       | 322  | 167,357        | 490             | 186,3 | 105,2   | 167,531        | 490             | 184,6 | 105,2  |
| 25  | 219A      | 122  | 166,972        | 435             | 122,8 | 90,8    | 167,548        | 435             | 123,6 | 90,3   |
| 26  | 43A       | 322  | 167,467        | 505             | 188,3 | 92,6    | 166,995        | 505             | 187,6 | 92,7   |
| 27  | 67B       | 121  | 167,083        | 500             | 159,8 | 98,0    | 167,489        | 505             | 164,2 | 99,1   |
| 28  | 17A       | 130  | 167,111        | 420             | 133,0 | 84,7    | 167,545        | 420             | 131,3 | 84,6   |
| 29  | 4B        | 130  | 167,403        | 440             | 126,5 | 105,4   | 167,468        | 445             | 128,7 | 105,6  |
| 30  | 145B      | 124  | 167,287        | 420             | 142,8 | 110,0   | 167,350        | 420             | 152,6 | 107,0  |
| 31  | 2A        | 130  | 167,443        | 440             | 152,6 | 115,4   | 167,423        | 440             | 143,7 | 114,8  |
| 32  | 7B        | 130  | 167,392        | 440             | 133,2 | 105,4   | 167,323        | 440             | 133,8 | 104,9  |

SoSI (Sortenschlüssel)

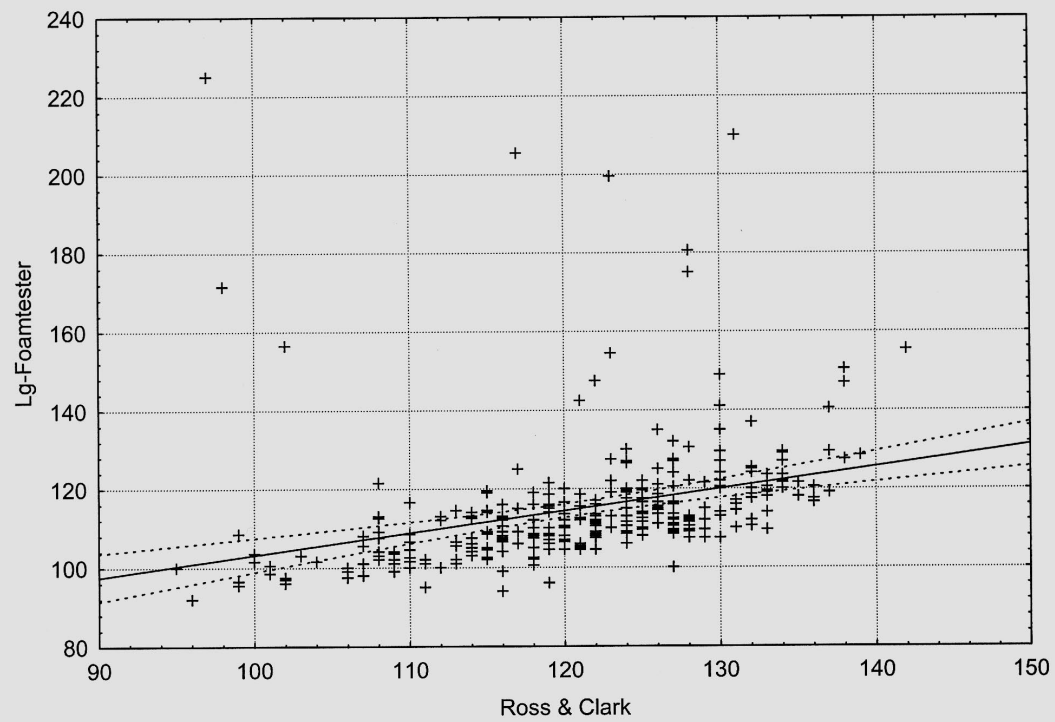
111 Vollbier, hell  
 121 Export, hell  
 122 Export, dunkel  
 123 Kellerbier, unfiltriert  
 124 Märzen  
 130 Pils  
 142 Bock, dunkel  
 198 Schankbier, UG  
 321 Weizenvollbier, FG  
 322 Weizenexport, FG  
     Alkoholfreies  
 364 Weizen, FG  
 398 Weizenschankbier

HLT Half Life-Time  
 FD First Drain

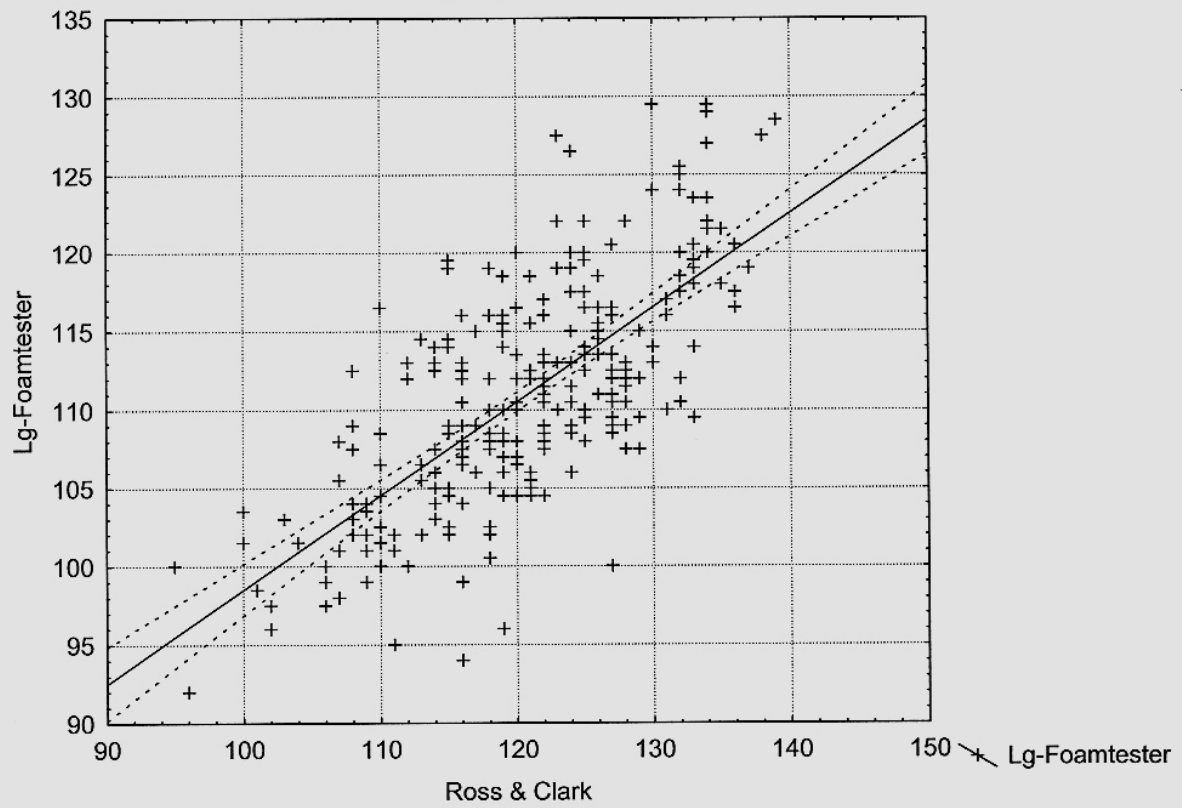
**Die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in Wasser  
als Funktion von Druck und Temperatur**



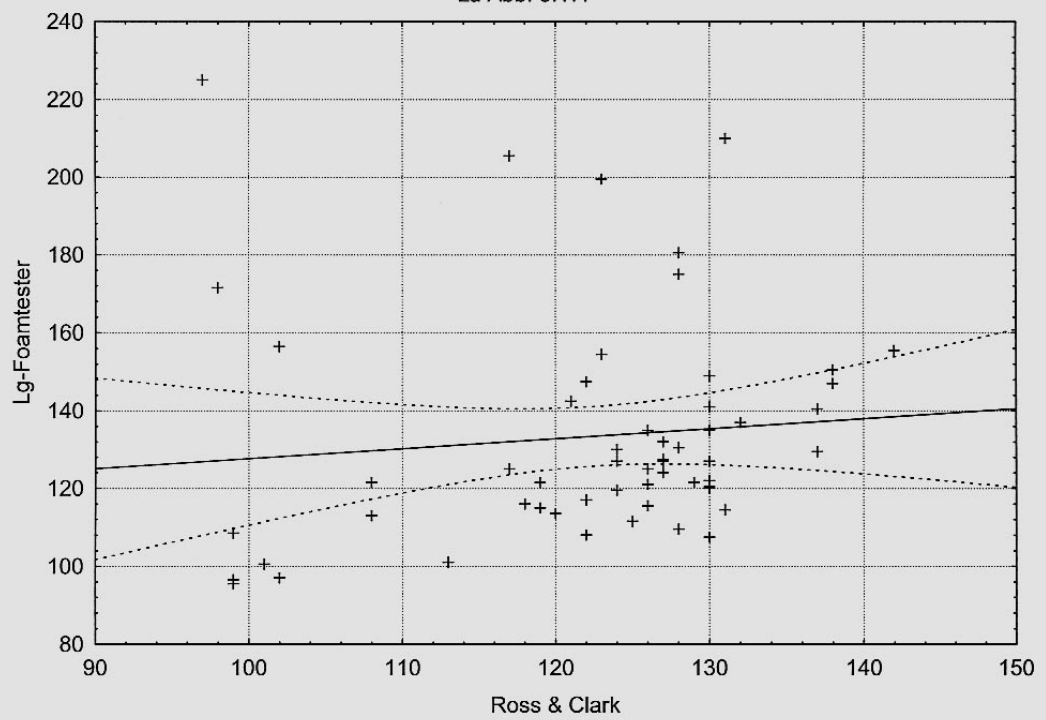
Abschätzung des Konfidenzintervalls (0,95)  
zu Abb. 5.15.



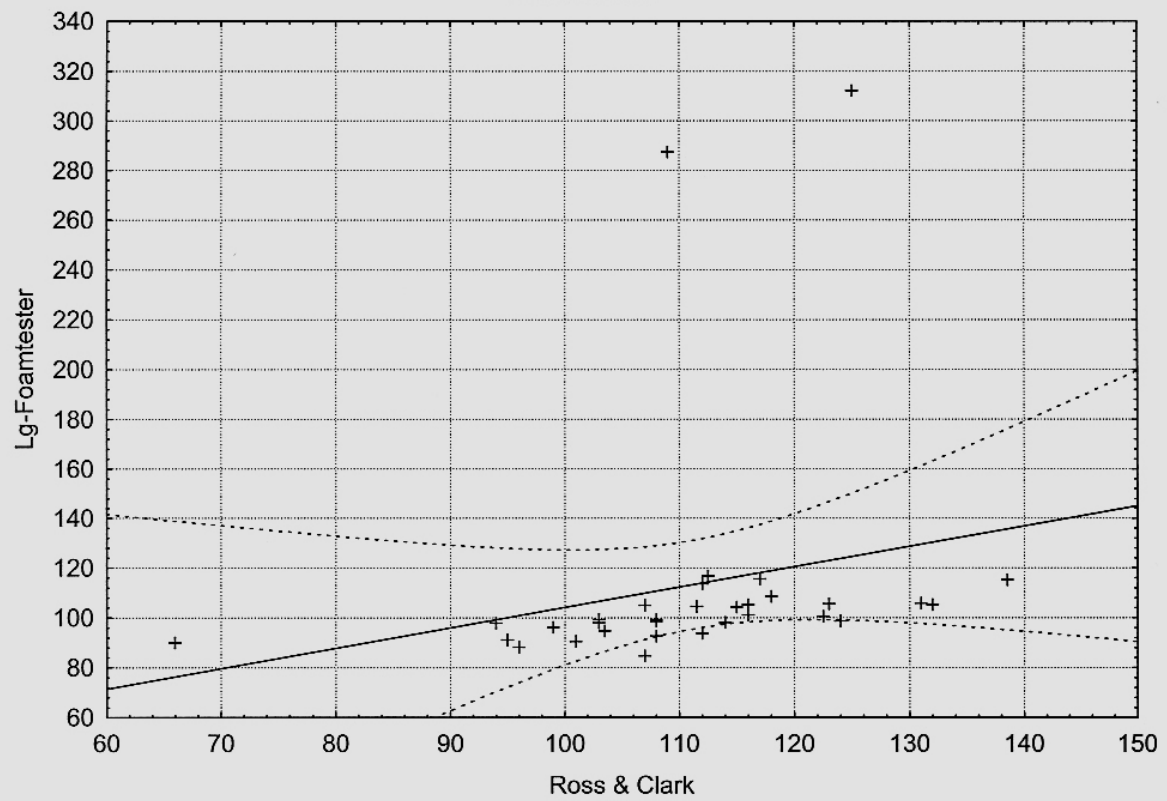
Abschätzung des Konfidenzintervalls (0,95)  
zu Abb. 5.16.



Abschätzung des Konfidenzintervalls (0,95)  
zu Abb. 5.17.



Abschätzung des Konfidenzintervalls (0,95)  
zu Abb. 8.12.



## DLG Bewertungsschema für Bierschaum

### Vollbiere

| Qualitätszahl | Ross & Clark | Lg-Foamtester |             |
|---------------|--------------|---------------|-------------|
| 5,0           | 130          | 120           | Obergrenze  |
| 4,9           | 129          | 119           |             |
| 4,8           | 128          | 118           |             |
| 4,7           | 127          | 117           |             |
| 4,6           | 126          | 116           |             |
| 4,5           | 125          | 115           |             |
| 4,4           | 124          | 114           |             |
| 4,3           | 123          | 113           |             |
| 4,2           | 122          | 112           |             |
| 4,1           | 121          | 111           |             |
| 4,0           | 120          | 110           |             |
| 3,9           | 119          | 109           |             |
| 3,8           | 118          | 108           |             |
| 3,7           | 117          | 107           |             |
| 3,6           | 116          | 106           |             |
| 3,5           | 115          | 105           | Untergrenze |

### Schankebiere und Biere mit niedrigen Stammwürzegehalt

| Qualitätszahl | Ross & Clark | Lg-Foamtester |             |
|---------------|--------------|---------------|-------------|
| 5,0           | 125          | 115           | Obergrenze  |
| 4,9           | 124          | 114           |             |
| 4,8           | 123          | 113           |             |
| 4,7           | 122          | 112           |             |
| 4,6           | 121          | 111           |             |
| 4,5           | 120          | 110           |             |
| 4,4           | 119          | 109           |             |
| 4,3           | 118          | 108           |             |
| 4,2           | 117          | 107           |             |
| 4,1           | 116          | 106           |             |
| 4,0           | 115          | 105           |             |
| 3,9           | 114          | 104           |             |
| 3,8           | 113          | 103           |             |
| 3,7           | 112          | 102           |             |
| 3,6           | 111          | 101           |             |
| 3,5           | 110          | 100           | Untergrenze |

#### Diätbiere

| Qualitätszahl | Ross & Clark | Lg-Foamtester |             |
|---------------|--------------|---------------|-------------|
| 5,0           | 110          | 100           | Obergrenze  |
| 4,9           | 109          | 99            |             |
| 4,8           | 108          | 98            |             |
| 4,7           | 107          | 97            |             |
| 4,6           | 106          | 96            |             |
| 4,5           | 105          | 95            |             |
| 4,4           | 104          | 94            |             |
| 4,3           | 103          | 93            |             |
| 4,2           | 102          | 92            |             |
| 4,1           | 101          | 91            |             |
| 4,0           | 100          | 90            |             |
| 3,9           | 99           | 89            |             |
| 3,8           | 98           | 88            |             |
| 3,7           | 97           | 87            |             |
| 3,6           | 96           | 86            |             |
| 3,5           | 95           | 85            | Untergrenze |

Innerhalb weiterer Qualitätsparameter geht die Schaumstabilität mit 20 % in die Ermittlung der Gesamtqualitätszahl ein.